

Mitteilung des Instituts
für Grundbau und Bodenmechanik
Technische Universität Braunschweig

Heft Nr.14

Herausgegeben von Prof. Dr.- Ing. H. Simons

**Spannung-Verformungsverhalten
überkonsolidierter Tone
und dessen Abhängigkeit von
ingenieurgeologischen Merkmalen**

von
Ernst-Werner Raabe

Braunschweig 1984

VORWORT

Herr Raabe untersuchte die bodenmechanischen Eigenschaften norddeutscher überkonsolidierter Tone von der Unterkreide bis zum Quartär.

Die Aufgabenstellung war:

- Welche Besonderheiten zeigen die Tone bei ihrer Klassifikation ?
- Zeigen die Tone anisotropes Verhalten bei Gebrauchszuständen und bei Grenzzuständen ?
- Können Abhängigkeiten von der Belastungsart bei Gebrauchszuständen und Grenzzuständen festgestellt werden ?
- Welche mineralogischen und geologischen Merkmale zeigen die Tone (Mineralbestand, Primärspannungszustand, Gefüge) ?
- Können die beobachteten mechanischen Verhaltensweisen, insbesondere Anisotropieerscheinungen bei Gebrauchs- und Grenzzuständen, mit mineralogischen und geologischen Merkmalen erklärt werden ?

Auf fast alle Fragen enthält die Arbeit neue Antworten, die wieder Fragen aufwerfen, wie es häufig in der Wissenschaft geschieht.

Es zeigt sich, daß man mit dem Übertrag von Erfahrungen - gewonnen durch Messungen im Feld und Labor oder an Bauwerken - bei solchen Böden noch sehr vorsichtig sein muß. Hierüber ist noch erhebliche Forschung, vor allem aufbauend auf Feldmessungen erforderlich, um sicher und wirtschaftlich in oder mit solchen Böden zu bauen.

Wir danken den Geologisch-Paläontologischen Instituten der Universitäten Berlin und Göttingen, daß wir mit ihren Versuchseinrichtungen den Mineralbestand, REM-Untersuchungen und Texturanalysen an den Tonen durchführen konnten.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft hat im Rahmen des Schwerpunktprogrammes "Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgestein" die Arbeit wesentlich gefördert, wofür wir hiermit herzlich danken.

Braunschweig, den 15.05.84

Hanns Simons

SUMMARY

In this research work an attempt has been made to interpret the mechanical behaviour of overconsolidated clays from the stratigraphic periods cretaceous to quaternary by investigating their classification, mineralogical and geological characteristics.

Oedometer tests on undisturbed and remoulded samples of different orientations were used to analyze the anisotropic behaviour and to prepare samples for the following microfabric testing program.

A micro-computer controlled triaxial testing system developed as part of this work was used to study the mechanical behaviour of undisturbed samples under working and limit loads. Stress path dependence of deformation, pore pressure and strength characteristics were evaluated.

Mineral content and microfabric features were analyzed by X-ray diffraction methods. The results were verified by scanning microscope investigations.

Mineral content, size and orientation of clay particles, diagenetic bonds and void ratio were related to geotechnical properties.

Finally the results are discussed with regard to their practical importance.

INHALT

I. Literatur

II. Bezeichnungen

<u>1. EINLEITUNG</u>	1
<u>2. ÜBERKONSOLIDIERTE TONE</u>	1
2.1 Geologische und mineralogische Besonderheiten	2
2.2 Bodenmechanische und -physikalische Besonderheiten	6
2.2.1 Spannungsgeschichte und Überkonsolidation	6
2.2.2 Anisotropie	9
2.2.3 Zusammendrückungsverhalten	10
2.2.4 Verhalten bei Grenzzuständen	12
2.3 Zusammenfassung und Aufgabenstellung	20
<u>3. UNTERSUCHTE TONE UND PROBENNAHME</u>	21
3.1 Auswahl und stratigraphische Einordnung	21
3.2 Geologische Kurzbeschreibung	24
3.2.1 Kreide- Tone	24
3.2.1.1 Aufschluß Mehrum	24
3.2.1.2 Aufschluß Woltorf	25
3.2.1.3 Aufschluß Anderten	25
3.2.2 Oligozän-Tone	25
3.2.2.1 Aufschluß Sprendlingen	25
3.2.2.2 Aufschluß Ochsendorf	26
3.2.3 Miozän-Tone	26
3.2.3.1 Aufschluß Kirchgellersen	27
3.2.3.2 Aufschluß Hamburg	28
3.2.4 Quartär-Tone	28
3.2.4.1 Aufschluß Querenstede	30
3.2.4.2 Aufschluß Edewecht	30
<u>4. BODENMECHANISCHE KLASSIFIKATION</u>	30
4.1 Kornverteilung	30
4.2 Korndichte	35
4.3 Dichte, Wassergehalt und Porenzahl	35
4.4 Konsistenzgrenzen und Folgewerte	35
4.5 Kalkgehalt und Glühverlust	36
4.6 Zusammenhänge und Bewertung	37

<u>5. ZUSAMMENDRÜCKUNGS- UND QUELLVERHALTEN</u>	40
5.1 Versuchsgeräte und Versuchsdurchführung	40
5.2 Versuchsergebnisse	42
5.2.1 Vorbelastungen und äquivalente Spannungen	42
5.2.2 Quellverhalten	47
5.2.3 Steifigkeiten	47
5.3 Beobachtete Besonderheiten	50
<u>6. FESTIGKEITS- UND VERFORMUNGSVERHALTEN</u>	51
6.1 Vorbemerkungen	51
6.2 Triaxialversuche mit verschiedenen Spannungspfad	52
6.2.1 Versuchsanlage	52
6.2.2 Datenerfassung	54
6.2.3 Steuerung	55
6.2.4 Probenvorbereitung und Einbau	61
6.2.5 Konsolidation und Sättigung	61
6.2.6 Abscheren und Ausbau	62
6.3 Versuchsergebnisse	62
6.3.1 Einbauwerte und Quellverhalten	62
6.3.2 Konsolidationsverhalten	64
6.3.3 Verhalten bei Scherbelastung	68
6.3.3.1 Spannungspfade	71
6.3.3.2 Arbeitslinien	74
6.3.3.3 Verformungsmoduli	74
6.3.3.4 Porenwasserdruckverhalten	82
6.3.3.5 Scherparameter	89
6.4 Standardtriaxialversuche	93
6.4.1 Vorbemerkungen	93
6.4.2 Versuchsergebnisse	94
6.5 Beobachtete Besonderheiten	99
<u>7. INGENIEURGEOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN</u>	101
7.1 Vorbemerkungen und Fragestellung	101
7.2 Untersuchung des Mineralbestandes	101
7.3 Untersuchung der Mikrostruktur	104
7.3.1 Lichtmikroskopische Untersuchungen	104
7.3.2 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen	106
7.3.3 Röntgentexturanalysen	115
7.3.3.1 Versuchstechnik	115
7.3.3.2 Texturparameter	116
7.3.3.3 Ergebnisse und Bewertung	118
7.4 Felduntersuchungen	122
7.4.1 Geräte und Methode	123
7.4.2 Ergebnisse und Bewertung	125

<u>8. DEUTUNG BODENMECHANISCHER VERSUCHSERGEBNISSE</u> <u>MIT INGENIEURGEOLOGISCHEN MERKMALEN</u>	125
8.1 Bodenphysikalische Kennwerte	125
8.2 Zusammendrückungs- und Quellverhalten	127
8.2.1 Vorbelastung und äquivalente Spannungen	127
8.2.2 Zusammendrückbarkeit	130
8.2.3 Quellverhalten	131
8.3 Verhalten bei undrainierter Scherbeanspruchung	133
8.3.1 Spannungspfade und Porenwasserdruck- verhalten	133
8.3.2 Arbeitslinien und Steifemoduli	135
8.3.3 Grenzzustände	137
<u>9. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN</u>	138

I. LITERATUR

- AMERASINGHE, S.F. und PARRY, E.H.G. (1975):
Anisotropy in heavily overconsolidated Kaolin
Journ. of the Geotechn. Engineering Division, ASCE,
Vol. 101, GT 12, pp. 1277 - 1293
- ATKINSON, J.H. (1975):
Anisotropic elastic deformations in laboratory tests
on undisturbed London Clay
Geotechnique 25, No. 2, 357 - 374,
- BALASUBRAMANIAM, A.S. (1977):
Stress strain behaviour of stiff Bangkok Clay
Proc. 9th ICSMFE, Tokio, Vol. 2, 31 - 38
- BARDEN, L. und SIDES, G.R. (1971):
Sample disturbance in the investigation of clay
structure
Geotechnique 21, No. 3, 211 - 222
- BERNHARD, H. (1962):
Der Drucksetzungsversuch als Hilfsmittel zur Ermittlung
der Mächtigkeit des pleistozänen Inlandeises in Nord-
westniedersachsen
Mitt. aus dem Geol. Inst. der Techn. Hochschule Hannover
Heft 1
- BISHOP, A.W. und HENKEL, D.J. (1962):
The Measurement of soil properties in the Triaxial Test
Edward Arnold, 2te Auflage, Neudruck 1976
- BJERRUM, L. (1973):
Problems of soil mechanics and construction on soft clays
Proc. 8th ICSMFE, Moskau, Vol. 3, 109 - 159
- BRINKMANN, R. (1966):
Abriß der Geologie
Enke Verlag, Stuttgart
- BROOKER, E.W. und IRELAND, H.O. (1965)
Earth pressure at rest related to stress history
Canad. Geotechn. Journal, Vol. II, No. 1
- CAIRNCROSS, A.M. und JAMES, R.G. (1977):
Anisotropy in overconsolidated clays
Geotechnique 27, No. 1, 31 - 36,
- CASAGRANDE, A. (1936):
The determination of the pre-consolidation load and its
practical significance
Proc. ICSMFE, III, 60 - 64, Cambridge (Mass.)
- CHANDLER, R.J. (1979):
Stability of a structure constructed in a landslide
Selection of soil strength parameters
Proc. 7th ECSMFE, Vol. 3, 175 - 182, Brighton
- COLLINS, K. und McGOWN, A. (1974):
The form and function of microfabric features in a va-
riety of natural soils
Geotechnique 24, No. 2, 223 - 254,

- DUNCAN, J.M. und SEED, H.B. (1966):
Strength variation along failure surfaces in clay
Journ. of the Soil Mech. and Found. Div., Proc. ASCE
Vol. 92, No. SM 6, 81 - 104
- ENGELHARDT, W.v. (1973):
Die Bildung von Sedimenten und Sedimentgesteinen
Sediment-Petrologie, Teil III, Verlag Schweitzerbart
Stuttgart
- ERNST, G. (1968):
Die Oberkreide-Aufschlüsse im Raume Braunschweig-Hannover und ihre stratigraphische Gliederung mit Echinodermen und Belemniten
Beihefte Ber. Naturhist. Ges., 119, 113 - 126, Hannover
- FALKE, H. (1960):
Rheinessen und die Umgebung von Mainz
Sammlung geologischer Führer, Band 38, Verlag Gebrüder Borntraeger, Berlin
- FRANKE, E. und SCHUPPENER, B. (1978):
Die $\phi=0$ -Analyse - Bestandsaufnahme und neue Entwicklungen
Die Bautechnik 55, Heft 7, 231 - 239
- FOLK, R.L. und WARD, W.C. (1957):
Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters
Journ. Sedim. Petrol., No. 27, 3 - 26
- FROSS, M. (1973):
Untersuchungen über die Zusammendrückbarkeit vorbelasteter toniger Böden des Wiener Beckens
Mitt. Inst. für Grundbau und Bodenmech., TH Wien, No.12
- FÜRCHTBAUER, H. und MÜLLER, G. (1974):
Sedimente und Sedimentgesteine
Sedimentpetrologie, Teil II
Verlag Schweitzerbart, Stuttgart, 3 Aufl.
- GIBSON, R.E. (1974):
Fourteenth Rancine Lecture: The analytical method in soil mechanics
Geotechnique, Vol.24, No.2, 115 - 140
- GILLOT, J.E. (1968):
Study of the fabric of fine-grained sediments with the scanning electron-microscope
Journ. Sedim. Petrol. 39, 90 - 105
- GOLDSCHIEDER, M. (1980):
Arbeitsblätter zur Vorlesung und Übung Bodenmechanik II
Studienunterl. des Inst. für Bodenmechanik und Grundbau der Univers. Karlsruhe, Ausgabe WS 1979/80
- GRAHAM, J. und HOULSBY, G.T. (1983):
Anisotropic elasticity of a natural clay
Geotechnique 33, No. 2, 165 - 180
- GRIPP, K. (1964):
Erdgeschichte von Schleswig-Holstein
Verlag K.Wachholtz, Neumünster

- GRONEMEIER, K., MATTHESS, G., PEKOEGER, A., SCHENK, D. und SIEMS, A. (1981):
Geochemie, Mikrogefüge und bodenmechanische Eigenschaften von halbfesten Gesteinen
Geotechnik 4, Heft 1, 25 - 33
- GRÜNDER, J. (1978):
Struktureller Aufbau und geomechanische Eigenschaften eines stark überkonsolidierten Tons - am Beispiel des Feuerletzens
Veröff. des Grundbauinst. der Landesgewerbeanstalt Bayern, Heft 31, Eigenverlag LGA, Nürnberg
- GUDEHUS, G. (1981):
Bodenmechanik
Enke Verlag, Stuttgart
- HENKEL, D.J. und WADE, N.H. (1966):
Plane strain tests on a saturated remoulded clay
Journ. of the Soil Mech. and Found. Div., Proc. ASCE Vol. 92, No. SM 6, 67 - 80
- HINSCH, W. (1952):
Leitende Molluskengruppen im Obermiozän und Unterpliozän des östlichen Nordseebeckens
Geol. Jahrbuch 67, 143 - 194
- HVORSLEV, M. (1960):
Physical components of the shear strength of saturated clays
Proc. ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, Boulder (Colorado)
- JAKY, J. (1944):
Talajmechanika (Bodenmechanik)
Budapest
- KEMPER, E. (1977):
Marine Unterkreide (kru)
in: Geol. Karte von Niedersachsen 1:25000, Erläuterungen zu Blatt Hämeler Wald Nr. 3626, 22 - 42, Hannover
- KÉZDI, A. (1973):
Handbuch der Bodenmechanik, Band I-III
VEB-Verlag, Berlin
- KHERA, R. und SCHULZ, H. (1981):
Anisotropie im Lastsetzungsverhalten und Festigkeitsverhalten eines Kreidetons von Anderten
DFG-Zwischenbericht Schu 483/1, Karlsruhe, unveröffentl.
- KRIZEK, R.J. (1977):
Fabric effects on strength and deformations of Kaolin clay
Proc. 9th ICSMFE, Vol. I, 169 - 176, Tokio
- KUNTSCHKE, K. (1982):
Materialverhalten von wassergesättigtem Ton bei ebenen und zylindrischen Verformungen
Veröff. des Inst. für Bodenmechanik und Felsbau der Univers. Karlsruhe, Heft 91
- LADD, C.C. (1971):
Strength parameters and stress-strain behaviour of saturated clays
Res. Report R 71-23, Soil Publ. 278, M.I.T

- LADD, C.C., FOOT, R., ISHIHARA, K., SCHLOSSER, F. und POULOS, H.G. (1977):
Stress-deformations and strength characteristics
Proc. 9th ICSMFE, Vol. II, 421 - 482, Tokio
- LAMBE, T.W. und WHITMAN, R.V. (1967):
Soil mechanics
Wiley Int. Edition, New York
- LIEBER, W. (1969):
Mineralogie in Stichworten
Verlag F.Hirt, Kiel
- MARSLAND, A. und RANDOLPH, M.F. (1977):
Comparisons of the results from pressuremeter tests and
large in-situ plate tests in London Clay
Geotechnique 27, No. 2, 217 - 243
- MASCHWITZ, G., RICHWIEN, W. und RIZKALLAH, V. (1978):
Das Einfachschergerät und Stand der dreiaxialen Ver-
suchstechnik im Institut für Grundbau und Bodenmechanik
der TU Hannover
Vortr. der Baugrundtagung 1978, Berlin, 251 - 273
- MATTIAT, B. (1969):
Eine Methode zur elektronenmikroskopischen Untersuchung
des Mikrogefüges in tonigen Sedimenten
Geol. Jahrbuch 88, 87 - 111
- McCONNACHIE, I. (1974):
Fabric changes in consolidated Kaolin
Geotechnique 24, No. 2, 207 - 222
- MESTWERDT, A. (1914):
Erläuterungen zur geologischen Karte, Blatt Heiligen-
dorf (39)
vergriff., Bibliothek NLFB, Hannover
- MITACHI, T. und KITAGO, S. (1980):
Undrained triaxial and plane strain behaviour of satu-
rated remoulded clay
Soils and Foundations, Vol. 20, No. 1, Japanese Society
of Soil Mech. and Found. Eng.
- MITCHELL, J.K. (1956):
The fabric of natural clays and its relation to engi-
neering properties
Proc. Highway Res. Board, 35, 693 - 713
- MITCHELL, J.K. (1976):
Fundamentals of Soil Behaviour
Wiley & Sons, New York
- MORGENSTERN, N.R. und TCHALENKO, J.S. (1967):
The optical determination of preferred orientation in
clays and its application to the study of microstructure
in consolidated kaolin
Proc. Royal Society, Series A, 300, 218 - 250
- NEUMANN, R. (1964):
Geologie für Bauingenieure
Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- PETERSON, R.F. (1954):
Studies of bearpaw shale at a site in saskatchewan
Proc. Americ. Soc. of Civ. Engen. 80, No. 476, 1 - 28

- RIZKALLAH, V. (1977):
Stress-strain behaviour of fissured stiff clays
Proc. 9th ICSMFE, Vol. I, 267 - 269, Tokio
- RUPPERT, F.R. (1980):
Bodenmechanische Eigenschaften der Lauenburger Serie
Ein Beispiel für Statistik in der Bodenmechanik
Mitt. Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik der
Techn. Univers. Braunschweig, Heft 4/1980
- RUPPERT, F.R. und SCHNEIDER, W. (1975):
Hinweise auf Zusammenhänge zwischen der Genese des
"Lauenburger Tons" und den Salzstrukturen Norddeutsch-
lands aufgrund tonmineralogischer Untersuchungen
N.Jb.Geol.Paläont.Mh., Jg 75, H. 10, 606 - 627
Stuttgart
- SCHEFFER, F. und SCHACHTSCHABEL, P. (1979):
Lehrbuch der Bodenkunde
10 Auflg., Enke-Verlag, Stuttgart
- SCHILLER, H.J. (1980):
Röntgenographische Texturuntersuchungen an feinkörnigen
Sedimenten unterschiedlicher Kompaktion
Bochumer geolog. und geotechn. Arbeiten 4
- SCHMIDT, F. (1974):
Erdgeschichte
Sammlung Göschen, Band 7021, W.D.Gruyter, Berlin
- SCHUCHT, F. (1908):
Der Lauenburger Ton als leitender Horizont für die Glie-
derung und Altersbestimmung des norddeutschen Diluviums
Jahrb. Kgl. preuß. geol. Landesanstalt 29, Teil 2
130 - 150, Berlin
- SCHULTZE, E. und MUHS, H. (1967):
Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten
Springer Verlag, Berlin
- SCHULZ, H. (1981):
Zur Festigkeit überverdichteter Tone
Mitt. der Bundesanst. für Wasserbau, Heft 50, Karlsruhe
- SIDES, G.R. (1972):
Soil microstructure and sample disturbance observations
in the stereoscan electron microscope
in: R.H.G.Parry (Ed.): Stress-strain Behaviour of Soils
Henley on Thames (Foulis)
- SIDES, G.R. und BARDEN, L. (1972):
The microstructure of dispersed and flocculated samples
of Kaolinite, Illite and Montmorillonite
Canad. Geotechn. Journ. 8, No 3
- SIMPSON, B., CALABRES, G., SOMMER, H. und WALLAYS, M. (1979)
Design parameters for stiff clays
Proc. 7th ECSMFE, Vol 5, Brighton
- SKEMPTON, A.W. (1954):
The pore pressure coefficients A and B
Geotechnique 4, 143 - 147
- SKEMPTON, A.W. (1953):
The colloidal activity of clays
Proc. 3rd ICSMFE, Vol. I, 57 - 61, Zürich

- STARZEWSKI, K. und THOMAS, L.P. (1977):
Anisotropic behaviour of an overconsolidated clay
Proc. 9th ICSMFE, Vol. I, 305 - 310, Tokio
- STRUVE, W. (1973):
Geologie des Mainzer Beckens
Courier Forschungsinst. Senckenberg, Frankfurt a.M.
- THOREZ, J. (1975):
Phyllosilikats and clay minerals
Lab. Handbook for the X-rays-diffraction-analysis
Edit. G. Lelotte, Dison, Belgien
- VAID, Y.P. und CAMPANELLA, R.G. (1974):
Triaxial and plane strain behaviour of natural clay
Journ. of the Geotechn. Eng. Div., ASCE, GT 3, 207 - 224
- VAN OLPHEN, H. (1963):
An introduction of clay colloid chemistry
Wiley, New York
- WARD, W.H., SAMUELS, S.G. und BUTLER, M.E. (1971):
Further studies of properties of London Clay
Geotechnique 9, No. 2, 33 - 58
- WARD, W.H., MARSLAND, A. und SAMUELS, S.G. (1965):
Properties of the London Clay at the Ashford Common
Shaft: in situ and undrained strength test
Geotechnique 15, No. 4, 321 - 344
- WETZEL, W. (1950):
Ultraschallaufbereitung von Gesteinsproben
Erdöl und Kohle, 1950, 212-214
- WIEGMANN, J. und KRANZ, G. (1961):
Beitrag zur quantitativen Mineralanalyse von Tonen,
Kaolinen und ähnlichen Gesteinen mittels röntgenogra-
phischer Methoden
Berichte der dt. keram. Gesellsch. 38, 294 - 302
- YUDBIR und VAKADARAJAN, A. (1975):
Stress path dependent deformation moduli of clay
Journ. of the Geot. Eng. Div., ASCE, GT 3, 315 -
- ZEEVART, L. (1953):
Diskussionsbeitrag
in: Proc. 3rd ICSMFE, Vol. III, 113 - 114, Zürich

II Bezeichnungen

1. Dimensionen

Drücke und Spannungen: $\text{kPa} = \text{kN/m}^2$

$\text{MPa} = \text{MN/m}^2$

Längen : m

$\mu\text{m} = \text{m} \cdot 10^{-6}$

$\text{\AA} = \text{m} \cdot 10^{-10}$

2. Geometrische Größen

β : Entnahmewinkel von Versuchsproben gegen Lotrechte

ε : Verformung (%)

θ : Bruchwinkel im Versuch

π : Neigungswinkel von Tonteilchen gegen die Probenoberfläche

ψ : Drehwinkel der Proben im Texturanalysator

3. Drücke und Spannungen, Folgewerte

K : Verhältnis Radialspannung/Axialspannung im Versuch

K_o : Erdruhedruckbeiwert

KV : Konsolidierverhältnis σ_e/σ'_v

p : mittlerer Druck $(\sigma_a + \sigma_r)/2$

p' : mittlerer Druck, effektive Spannungen

p_a : Horizontalspannung aus Pressiometerversuch

P_Q : Quelldruck

q : halbe Hauptspannungsdifferenz $(\sigma_a - \sigma_r)/2$

r' : Quotient der effektiven Hauptspannungen σ'_a/σ'_r

Δu : Porenwasserdruckänderung

Δu_s : Porenwasserdruckänderung aus Schubbeanspruchung

σ, σ' : Spannung, effektive Spannung

σ'_{vm} : geologische Vorbelastung

σ'_{vo} : geostatische Auflast in-situ

σ_e : zur Porenzahl äquivalente Spannung

$\sigma_{\ddot{o}}$: Vorbelastung, im Ödometer ermittelt

σ_{oct} : Oktaedrische Normalspannung $(\sigma_a + 2\sigma_r)/3$

τ_{oct} : Oktaedrische Schubspannung, hier: $(\sigma_a - \sigma_r) \cdot \sqrt{2}/3$

4. Bodenkenngößen und sonstige Parameter

a : Porenwasserdruckparameter nach HENKEL
a_l : wie a, für Anfangsbereich der Scherbelastung
a_f : wie a, für Grenzzustand
b' : $c' / \cos(\phi')$
c' : Kohäsion nach COULOMB
c_u : undrainierte Scherfestigkeit
C_c : Kompressionsbeiwert
C_s : Schwellbeiwert
e : Porenzahl
E_s : Steifemodul bei verhinderter Seitendehnung (Ödometer)
E_d : Verformungsmodul bei behinderter Seitendehnung
(Triaxialversuch)
H : relative Häufigkeit (%)
I_A : Aktivitätszahl
I_C : Konsistenzzahl
I_p : Plastizitätszahl
M : Verformungsmodul, Definition im Text
n : Versuchsanzahl
r : Korrelationskoeffizient
s : Standardabweichung
S_r : Sättigungszahl
T : Texturparameter, Einregelungsgrad
V_{ca} : Kalkgehalt
V_{gl} : Glühverlust
w : Wassergehalt
w_L : Wassergehalt an der Fließgrenze
w_p : Wassergehalt an der Ausrollgrenze
 α' : $\arctan(\sin\phi')$
 $\alpha_{a,i}$: Anisotropieparameter, Definition im Text
 α_k : wie $\alpha_{a,i}$
 ϕ' : innerer Reibungswinkel für effektive Spannungen

5. Indizes und Zeichen

a	: axial
c	: Konsolidationszustand
extr	: Maximal- oder Minimalwert
f	: Bruchzustand
h	: horizontal
o	: Anfangszustand
ö	: im Ödometer bestimmt
r	: radial
u	: undrainiert (volumenkonstant)
v	: vertikal
V	: volumetrisch
'	: effektiver Wert
*	: Parameter reduziert um den Betrag bei Beginn des betreffenden Belastungspfades

6. Abkürzungen

BK	: Belastungskompression
BE	: Belastungsextension
E	: Extension
EE	: Entlastungsextension
EK	: Entlastungskompression
K	: Kompression
OCR	: Überkonsolidierungsgrad

1. EINLEITUNG

Ingenieurbauten im norddeutschen Raum berühren sehr häufig oberflächennahe, durch erodierte Sedimentüberdeckung oder glaziale Auflast vorbelastete, steife bis halbfeste Lockergesteine, deren bodenmechanisches Verhalten von dem normalverdichteter Erdstoffe teilweise erheblich abweicht.

Ursächlich für die besonderen, im Gegensatz zu ähnlichen Böden in Großbritannien nur teilweise untersuchten Stoffeigenschaften dieser überkonsolidierten Tone sind neben dem Mineralbestand und der Korngrößenverteilung insbesondere die bei der Sedimentation entstandene Primärstruktur, die diagenetischen Veränderungen einschließlich der Veränderungen im Porenwasser und die parallel oder später aufgetretenen tektonischen oder glazialen Druck- und/oder Schubwirkungen. Auch die Art der grundbautechnischen Beanspruchung hat Einfluß auf das mechanische Verhalten.

Mit der Arbeit soll ein Beitrag zum Verständnis des bodenmechanischen Verhaltens überkonsolidierter Tone vorgelegt werden.

Die Grundlage dazu bildet ein an verschiedenen steifen bis halbfesten Tönen durchgeführtes, gleiches Versuchsprogramm, das Untersuchungen zum Mineralbestand, zum Gefüge und zu bodenmechanischen Grundkennwerten enthält.

Im Versuchsprogramm zum Spannungs-Verformungs-Verhalten werden kennzeichnende Parameter unter Randbedingungen, mit denen anisotropes Verhalten und Abhängigkeiten von der Art der Beanspruchung erfasst werden können, bestimmt.

Beobachtete Besonderheiten im bodenmechanischen Verhalten werden schließlich mit den ermittelten geologischen Parametern zu Mineralbestand, Gefüge und Primärspannungszustand interpretiert.

2. ÜBERKONSOLIDIERTE TONE

Tone sind nach bodenmechanischem Verständnis Erdstoffe, die Feinstbestandteile mit Korngrößen unter 0.002 mm enthalten und plastisches Verhalten zeigen. Maßgeblich für das mechanische Verhalten der Tone sind die aufgrund der geringen Größe der Teilchen zwischen diesen wirkenden Kräfte.

2.1 GEOLOGISCHE UND MINERALOGISCHE BESONDERHEITEN

Die maßgeblichen Bestandteile der als Tone klassifizierten Sedimente, die Tonminerale, sind durch Verwitterung von Festgesteinen, zumeist Feldspaten, durch mineralische Umbildung oder durch Neubildung entstanden.

Die zwei vorkommenden kristallinen Grundbausteine sind das SiO_4 -Tetraeder und das Aluminat-Oktaeder.

Die vielfältigen Mineraltypen entstehen durch die Bindungsart zwischen den Grundbausteinen, durch die Form der entstehenden Schichtpakete und die anstelle von Aluminium- oder Siliziumatomen im Kristallgitter eingebauten Atome (Bild 1).

Bezeichnung		Schemat. Aufbau Tetraederein. Oktaederein.	Kristallgitter- abstand $y[\text{\AA}]$ $A = 10^{-10} \text{ m}$	Abmessung d. Tonminerale $[A]$ Dicke Durchm.		Spezifische Oberfläche $[m^2/g]$
Zwei-Schicht- Minerale	Kaolinit		7,1	500- 5000	3000 - 40000	10
	Montmorillonit		9,6 - 21,0	10- 1000	1000- 10000	800
Drei-Schicht- Minerale	Illit		10,0	100- 2000	1000- 20000	100
	Chlorit		14,2			5-50

Abmessungen und spezifische Oberfläche: ca.-Werte

Bild 1: Häufig vorkommende Tonminerale (in Anlehnung an LAMBE & WHITMAN, 1969)

Die kleinsten Mineraleinheiten, die Elementarschichten, können über Wasserstoffbindungen (Atombindungen) vergleichsweise fest oder über Ionenbindungen, meist weniger fest, zu Schichtpaketen, den Tonteilchen, verbunden sein.

Minerale mit Ionenbindungen können quellfähig sein. In einem solchen Falle werden polarisierte Wassermoleküle in der betreffenden Grenzschicht eingelagert und damit die Basisabstände vergrößert.

Häufig vorkommende Tonminerale sind Illite, Kaolinite, Chlorite und Smektitte, zu denen auch das Montmorillonitmineral

als eine Untergruppe gehört (Bild 2). Das mechanische Verhalten der Tone wird entscheidend von den an Flächen und Kanten der von den Elementarschichten gebildeten Teilchen verbleibenden Ladungen bestimmt. VAN OLPHEN (1951) bestätigte die bereits früher formulierte These der positiven Ladung von Teilchenkanten, die durch Unterbrechung der Kristallgitter entsteht (ENGELHARDT, 1973).

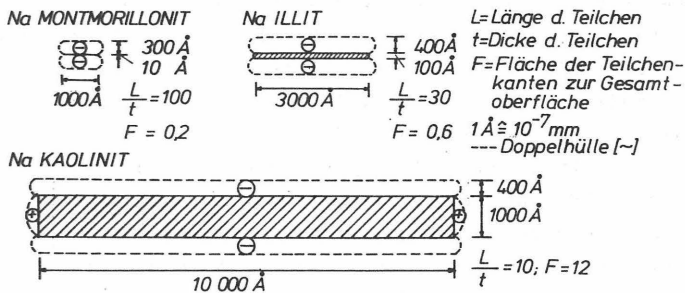


Bild 2: Schematische Darstellung von 3 Tonmineralen (nach LADD, 1971)

Die Oberfläche der Tonteilchen ist hingegen zumeist negativ geladen, so daß Kationen aus dem Porenwasser angezogen werden können. Auf diese Weise entstehen die "diffusen Doppelschichten" mit der negativen Teilchenfläche als der einen Schicht und dem Porenwasser einschließlich der enthaltenen Ionen als der anderen Schicht. Diese Doppelhüllen besitzen an ihren Außenseiten selbst wieder negative Ladungen. Ihre Abmessungen sind sehr unterschiedlich und von vielen Faktoren abhängig. Die Ladungsunterschiede an den Teilchen und ihre Wechselwirkung mit dem Porenwasser und den im Porenwasser verfügbaren Ionen bestimmen das Verhalten von Tönen während der Sedimentation, der Diagenese und der späteren Beanspruchung.

Ausgangsmaterial für die in marinen (Salzwasser) oder limnischen (Süßwasser), teilweise auch in brackischen Sedimentationsräumen abgelagerten Sedimente sind die durch Flüsse herantransportierten Schwebstoffe, deren Zusammensetzung von den im Einzugsgebiet anstehenden Gesteinen und der Art der Verwitterung abhängt. Von großer Bedeutung sind jedoch auch

die in vielen Sedimenten auftretenden späteren Neubildungen von Tonmineralen bei geeigneten chemischen Bedingungen im Porenwasser der Sedimente.

Im limnischen Milieu sedimentieren Partikel weitgehend einzeln und langsam, so daß bereits eine bevorzugte Ausrichtung der Teilchen auftreten kann. Im marinen Milieu werden die Abstoßungskräfte der Teilchen, die sich aus der überwiegend negativen Ladung der Teilchenflächen oder ihrer diffusen Hüllen ergeben (Bild 2), durch die Adsorption von im Salzwasser verfügbaren Kationen reduziert. Die Folge ist ein Zusammenlegen von Teilchen zu lockeren Aggregaten, die Flocken bilden und im Sediment zu den für viele junge Tone nachgewiesenen Waben- oder Kartenhausgefügen führen können.

Die Transportwege und Ablagerungsräume der Tone weisen im allgemeinen Bedingungen auf, unter denen Tonminerale stabil sind. Die Veränderungen, die als Mineralumbildungen, -neubildungen oder Kompaktion in großen Zeiträumen auftreten, werden unter dem Begriff Diagenese zusammengefaßt.

Die Kompaktion (mechanische Diagenese) umfaßt neben der Verdichtung durch Konsolidation auch die Verdichtung durch Änderung der primären Anordnung der Teilchen, bei der eine charakteristische Textur entstehen kann. Unter Textur wird dabei eine Ausrichtung der Tonteilchen im Raum verstanden, die durch die Richtung und die Intensität beschrieben werden kann. Für die Kompaktion auslösend war bei den Tönen neben der Eigenlast meist eine Sediment- oder Eisdecke oder, bei dichtem Material, ein Wasserdruck.

Die Parallelorientierung von Tonteilchen senkrecht zur Druckrichtung tritt bei vielen Tönen auf, obwohl auch von Ausnahmen berichtet wird (GILLOT, 1968; MORGENSTERN & TSCHALENKO, 1967).

Neben der mechanischen Diagenese findet parallel oder später eine chemische Diagenese statt, deren Prozesse auch den Tonmineralbestand (Umbildungen, Rückbildungen, Neubildungen) betreffen können. Typische Produkte der chemischen Diagenese können auch verschieden geformte, im Porenraum des Tones oder in einem Verdrängungsraum gebildete Mineralaggregate (Konkretionen) aus z.B. Calcit, Pyrit oder Gips sein.

Zahlreiche Autoren berichten über typische Sekundärgefüge von Tonen (Bild 3). Stellvertretend für die zahlreichen Arbeiten sollen die Ergebnisse von GRÜNDER (1978), der bei dem sehr hoch verdichteten Feuerletten ein diagenetisch stabilisiertes Primärgefüge fand, und die Ergebnisse von KRIZEK (1977) erwähnt werden, der bei rekonsolidierten Kaolinproben axialsymmetrische Strukturen nachweisen konnte. Die im Zuge der Diagenese auftretenden Gefügeänderungen können das bodenmechanische Verhalten der Tone ebenso und gegebenenfalls noch stärker prägen als das Primärgefüge. Insbesondere die bei der Kompaktion möglicherweise entstehende oder verbesserte Textur kann zu einem mehr oder weniger stark ausgeprägten anisotropen Verhalten führen. Gefügedaten von norddeutschen Tonen und Untersuchungen zu ihrer bodenmechanischen Bedeutung liegen nur in Einzelfällen vor (z.B. RIZKALLAH, 1977). Von der hier vorgesehenen einheitlichen Untersuchung mehrerer Tone können genauere Hinweise zur Bedeutung der dargestellten geologischen Merkmale auf das mechanische Verhalten von Tonen erwartet werden. Dies gilt insbesondere für die von zahlreichen Autoren herausgestellte Anisotropie im mechanischen Verhalten überkonsolidierter Tone (u.a. MITCHELL, 1956; COLLINS & McGOWN, 1974).

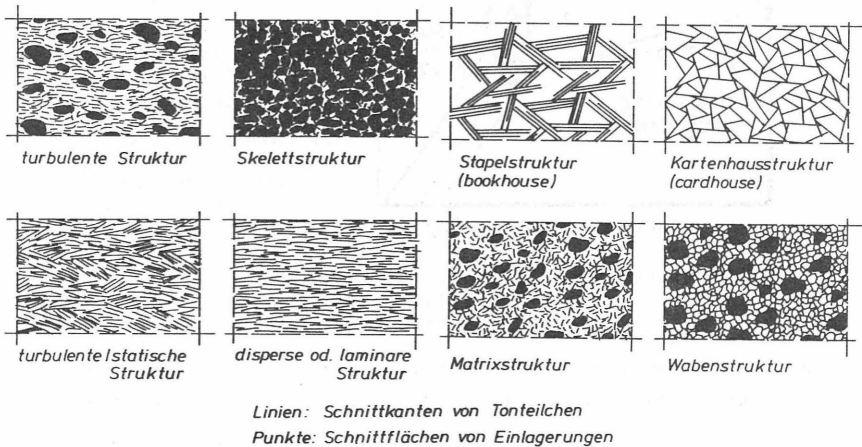


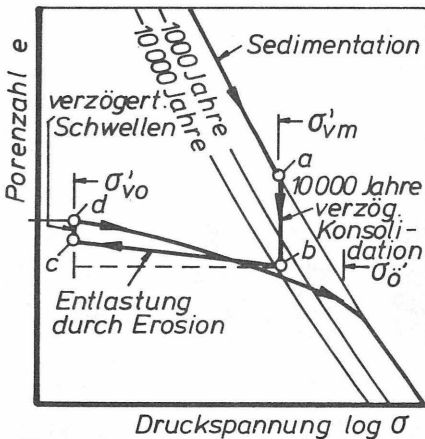
Bild 3: Gefüge von Tonen, schematisiert, in Anlehnung an BAR-den & SIDES (1971), u.a.

2.2 BODENMECHANISCHE UND -PHYSIKALISCHE BESONDERHEITEN

2.2.1 SPANNUNGSGESCHICHTE UND ÜBERKONSOLIDATION

Überkonsolidation entsteht bei Entlastung konsolidierter Bodenschichten von einer maximalen geostatischen Auflast σ'_{vm} auf eine neue Auflast σ'_{vo} . Dabei gehen die unter σ'_{vm} eingetretenen Verformungen und Gefügereaktionen nur teilweise zurück. Die verbleibenden Spuren der vormals höheren Last sind u.a. eine höhere Dichte und eine geringere Porenzahl im Vergleich zu den Werten, die sich bei gleicher Spannung, aber Erstbelastung, einstellen würden und eine typische Struktur.

Die verschiedenen Stadien der Be- und Entlastung eines überkonsolidierten Tones hat BJERRUM (1973) anschaulich beschrieben (Bild 4).



- a) Sedimentation unter Eigenlast und Bildung einer Zusatzauflast σ'_{vm} (z.B. Eis)
- b) Sekundäre Alterung
- c) Reduktion der Auflast durch Eisschmelze oder Erosion auf σ'_{vo}
- d) Sekundäres Schwellen
- e) Verhalten bei neuer zusätzlicher Belastung (Baumaßnahme oder Versuch), Knick bei $\sigma'_{o'}$

Bild 4: Spannungsgeschichte eines überkonsolidierten Tones, vereinfacht dargestellt im Druck-Porenzahl-Diagramm (in Anlehnung an BJERRUM, 1973)

Die Überkonsolidation eines Bodens wird allgemein mit dem Überkonsolidationsverhältnis OCR (Over-Consolidation-Ratio)

$$OCR = \sigma'_{vm} / \sigma'_{vo}$$

- OCR < 1: teilkonsolidiert
- OCR = 1: normalkonsolidiert
- OCR > 1: überkonsolidiert

beschrieben, also mit dem Verhältnis der maximalen Auflastspannung in vertikaler Richtung zu der zur Zeit vertikal wirkenden Spannung.

Bodenmechanisch präziser und von größerer praktischer Bedeutung ist die von GUDEHUS (1981) vorgenommene Definition eines Konsolidieverhältnisses

$$KV = \sigma_e / \sigma'_v$$

σ_e : der momentanen Porenzahl äquivalente Spannung
 σ'_v : entspricht σ'_{v0}

da diese Definition anstelle von σ'_{vm} die der momentanen Porenzahl äquivalente Spannung σ_e (siehe HVORSLEV, 1937) verwendet. Nur σ_e ist von praktischer Bedeutung und kann im Versuch unter günstigen Umständen ermittelt werden.

Der während der Vorbelastung wirkende, durch σ'_{vm} gekennzeichnete primäre Spannungszustand mit einer größeren vertikal wirkenden Hauptspannung σ'_1 ändert sich durch eine Entlastung.

Werden für die horizontalen Richtungen gleiche Hauptspannungen unterstellt ($\sigma'_2 = \sigma'_3 = \sigma'_h$), kann der Spannungszustand im Boden durch den Erdruhedruckbeiwert

$$K_o = \sigma'_h / \sigma'_v$$

σ'_h : horizontale Spannung
 σ'_v : vertikale Spannung

beschrieben werden. K_o kann bei Erstbelastung oder bei nichtbindigen Böden im allgemeinen (JAKY, 1943) mit

$$K_o = 1 - \sin \phi'$$

abgeschätzt werden. Für Tone ergeben sich K_o -Werte zwischen etwa 0,3 und 0,8.

Die Änderung der Spannungszustände bei Ent- und Wiederbelastung lassen sich bei ebener Betrachtung abstrahiert darstellen (Bild 5).

Der Erstbelastungspfad O-A ist in Bild 5 zur besseren Darstellung für einen sehr hohen Reibungswinkel eingetragen. Bei vertikaler Entlastung (Pfad A-B-C-D-E) nimmt die effektive Horizontalspannung σ'_h nicht im gleichen Maße wie σ'_v ab, so daß der K_o -Wert längs dieses Pfades laufend größer wird.

Grenzwert für K_o ist beim Entlastungspfad das Hauptspannungsverhältnis beim passiven Bruch. K_o -Werte größer als 1 sind

also möglich und für überkonsolidierte Tone zu erwarten. Bei Wiederbelastung aus der Entlastungsphase heraus können dann K_0 -Werte auftreten, die durch ein meist sehr geringes Mitanstiegen der horizontalen Spannungen bei Zunahme der Vertikalspannungen bestimmt werden (Pfade C-C'; D-D').

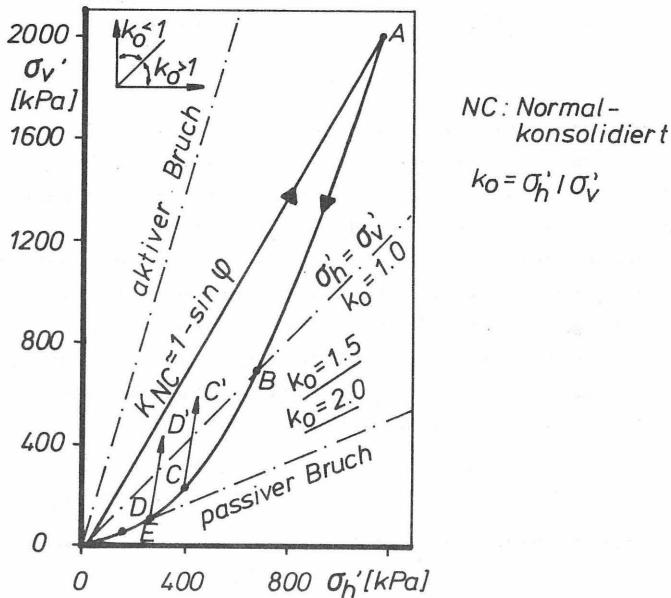


Bild 5: Idealisierte Spannungspfade für einfach überkonsolidierten Ton (in Anlehnung an BROOKER & IRELAND, 1966)

Die hohen K_0 -Werte in überkonsolidierten Tönen sind auf die im allgemeinen fehlende Entspannungsmöglichkeit in horizontaler Richtung bei Entlastung und Entspannung in vertikaler Richtung zurückzuführen.

Im Boden können unter diesen Umständen höhere Horizontalspannungen verbleiben als aus der Vertikalspannung und $K_0 = 1 - \sin \phi'$ berechenbar sind (Bild 5). Aus dem Bild wird außerdem deutlich, daß der Erdruehdruckbeiwert von überkonsolidierten Tönen keine Bodenkonstante ist, sondern abhängig vom Überkonsolidationsgrad sehr unterschiedliche Werte zeigen kann.

2.2.2 ANISOTROPIE

Erdstoffe zeigen "anisotropes Verhalten", wenn sie bei sonst gleichen Randbedingungen je nach Beanspruchungsrichtung ein unterschiedliches Spannungs-Verformungs-Verhalten aufweisen. Anisotropes Verhalten kann bei Gebrauchszuständen wie auch bei Grenzzuständen auftreten und wird in der Bodenmechanik häufig als axialsymmetrisch (Symmetrieachse: Normale auf der Schichtfläche, häufig: horizontal) angenommen.

Strukturanisotropie entsteht durch die bereits beschriebene Einregelung von Strukturelementen und kann bei Tonen durch Texturanalysen relativ gut erfasst werden.

Spannungsinduzierte Anisotropie kann auftreten, wenn durch eine neue Belastung eine Hauptspannungsdrehung erfolgt. Hauptachsendrehungen treten bei allen Baugrundbeanspruchungen auf, beispielsweise an einem Bodenelement unter Einwirkung einer Fundamentlast (Bild 6) oder entlang der Gleitfläche eines Böschungsbruches (Bild 7). Dort tritt eine Hauptspannungsdrehung von Entlastungskompression (Böschungsoberkante) bis Belastungsextension (Böschungsfuß), also eine Drehung um 90° auf, die im Zwischenbereich stetig verläuft.

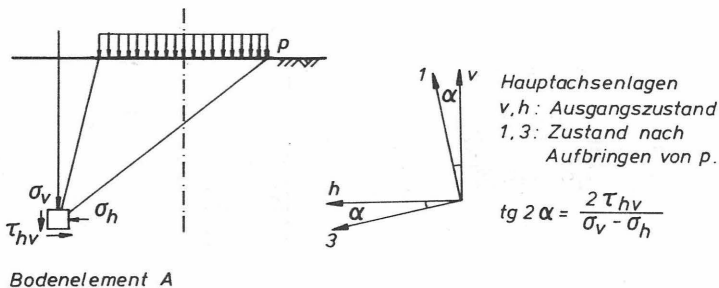


Bild 6: Hauptspannungsdrehung an einem Bodenelement durch eine Flächenlast (Annahme: ebener Spannungszustand)

Gerade bei Tonen mit einer ausgeprägten Strukturanisotropie kann das anisotrope Verhalten durch Hauptspannungsdrehungen verstärkt werden. Eine Trennung beider Anisotropieanteile ist kaum möglich.

Die Untersuchung der Anisotropie im mechanischen Verhalten von überkonsolidierten Tonen und die Deutung dieses Verhaltens

mit gemessenen Strukturdaten wird im Folgenden durchgeführt.

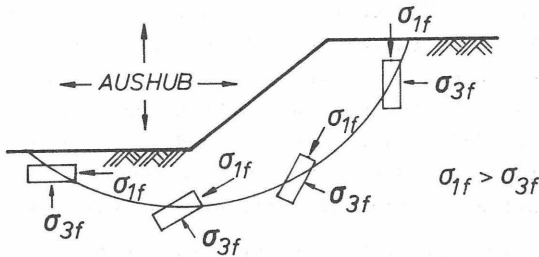


Bild 7: Hauptachsendrehung entlang der Gleitfläche in einer Böschung (ebener Spannungszustand)

2.2.3 ZUSAMMENDRÜCKUNGSVERHALTEN

Anisotropes Verhalten kann bei der Zusammendrückung von Tonen (Gebrauchszustände) auftreten.

In der Bodenmechanik wird unter dem Begriff Zusammendrückungsverhalten das einaxiale Formänderungsverhalten bei verhinderter Seitendehnung ("ödometrische Belastung") verstanden und im allgemeinen im Kompressionsversuch ("Ödometerversuch") untersucht (Bild 8).

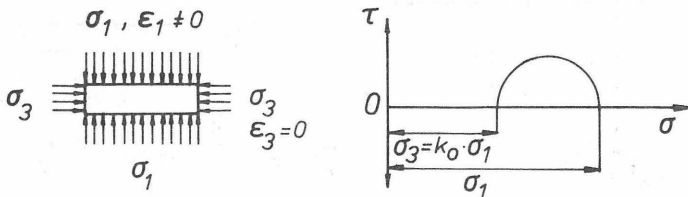


Bild 8: Spannungszustand bei ödometrischer Belastung (rotationssymmetrisch)

Die denkbare Spannungsgeschichte einer Bodenprobe, die im Ödometerversuch untersucht wird, ist mit dem Druck-Porenzahl-Diagramm graphisch darstellbar (Bild 9). Die in diesem Versuch als Grenze zwischen Erst- und Wiederbelastungsast auftretende Spannung wird allgemein als die maximale geologische Auflast σ'_{vm} interpretiert. Diese Spannung, die im Folgenden mit σ'_0

bezeichnet wird, entspricht jedoch nur dann der tatsächlichen maximalen Auflast, wenn die betreffende Probe den Zustand bei maximaler Auflast noch "gespeichert" hat, also noch die betreffende Porenzahl und Struktur besitzt.

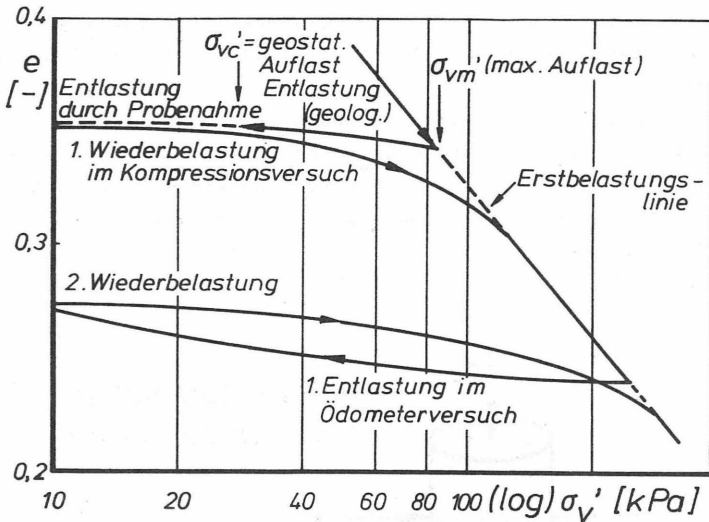


Bild 9: Idealisierte Druck-Porenzahl-Linie eines überkonsolidierten Tones von der Probennahme bis zum Versuch

ZEEVART (1953) hat Vorbelastungswerte von horizontal und vertikal zur Sedimentationsachse entnommenen Proben verwendet, um damit den Primärspannungszustand von "Mexico-Clay" über $K_o = \sigma'_{oh} / \sigma'_{ov}$ zu erfassen. Dieser Ansatz muß kritisch gesehen werden. Mit dem so erhaltenen K_o -Wert kann allenfalls eine Anisotropie im Boden erkannt werden, die beide beschriebenen Anisotropieanteile enthalten wird.

FROSS (1972) wie auch KHERA & SCHULZ (1981) untersuchten gleichfalls richtungsorientiert entnommene Proben im Ödometerversuch. Sie beobachteten bei ungestörten Proben eine deutlich geringere Zusammendrückbarkeit in horizontaler als in vertikaler Richtung, bei aufbereiteten und rekonsolidierten Proben hingegen das Gegenteil.

In der vorliegenden Arbeit sollen Ödometerversuche zur Erfassung von anisotropem Verhalten verwendet werden.

2.2.4 VERHALTEN BEI GRENZZUSTÄNDEN

Auch beim Herbeiführen von Grenzzuständen können überkonsolidierte Tone anisotropes Verhalten und Abhängigkeiten von Gefügemerkmalen zeigen.

Grenzzustände werden bei den folgenden Untersuchungen mit dem Triaxialversuch (DIN 18137, Teil 2, Entwurf) herbeigeführt.

Im Triaxialversuch wird die Bodenprobe einer zylindrischen Verformung bis zum Bruch unterworfen, die Richtungen der Hauptspannungen σ_a und σ_r bleiben während des Versuch unverändert. Üblich ist die Beanspruchung der Probe durch zylindrische Kompression, bei der σ_a bei konstanter Spannung σ_r (Bild 10) bis zum Bruch gesteigert wird.

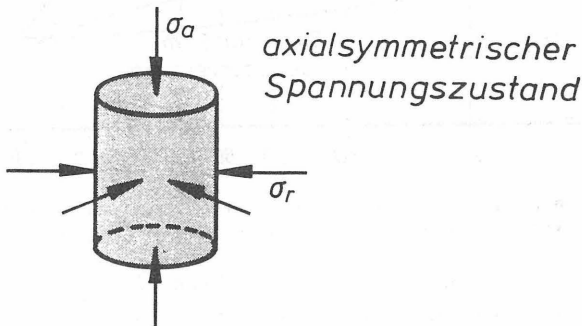


Bild 10: Zylindrische Beanspruchung im Triaxialversuch

Bei zylindrischer Extension (Hauptspannungsdrehung um 90°) wird die axiale Spannung kleiner als die radiale Spannung. Ein Grenzzustand kann im Kompressions- wie im Extensionsfall durch Belastung (Erhöhen einer Hauptspannung) und durch Entlastung (Erniedrigen einer Hauptspannung) herbeigeführt werden.

Für Kompression und Extension müssen nicht notwendigerweise zur p-Achse symmetrische Grenzbedingungen (k_f -Linien in Bild 11) gelten. Beanspruchungen in-situ wie im Versuch lassen sich für vereinfachte Verhältnisse (ebener Fall) sehr gut mit Spannungspfaden (Bild 11) darstellen.

Konsolidationsbedingungen variieren können. Da angenommen werden kann, daß mindestens bei einer Hauptspannungsdrehung in der Konsolidationsphase des Versuchs gegenüber dem in-situ-Zustand Umorientierungen im Gefüge auftreten werden, die zu verfälschten Scherparametern führen können, sollte der für die Konsolidation gewählte K-Wert dem in-situ-Wert möglichst nahe kommen.

Eine Messung des Primärspannungszustandes, der im optimalen Fall in der Konsolidationsphase approximiert werden sollte, ist ohnehin in vergleichbaren Böden nur in Ausnahmefällen gelungen (z.B.: PETERSON, 1954).

Eine Bestimmung des K_0 -Wertes an halbfesten Tönen durch versuchstechnisches Einhalten der Erdruchdruckbedingung (Horizontaldehnung = 0) ist wegen der hohen Steifigkeit der Tone nur mit allergrößtem Aufwand (Radialdehnungsmessungen an mehreren Stellen auf dem Probenumfang, Mitführen der Geber bei Axialdehnungen etc.) möglich. Bei weichen bis steifen Tönen hingegen gelingt eine K_0 -Konsolidation eher.

Es ist festzuhalten, daß zur Vermeidung einer Umorientierung in der Mikrostruktur von Tonproben ein möglichst realistischer K_0 -Wert für den Konsolidationsspannungszustand gewählt werden muß.

Die sich an die Konsolidation anschließende Belastung bis zum Bruch beim undrainierten Versuch kann mit Spannungspfaden dargestellt werden. In Bild 12 wird dabei von einem für normalkonsolidierte Tone abschätzbaren K_0 -Wert von 0.5 ausgegangen. Es wird erkennbar, daß für den Extensionsbruch sehr viel größere Spannungsänderungen (TSP 2) erforderlich sind als für den Kompressionsbruch (TSP 1), da der Konsolidationsspannungszustand näher an der Grenzbedingung für den Kompressionsfall liegt. Eine Hauptspannungsdrehung nach der Konsolidation, im Beispiel eine beginnende Extensionsbelastung, kann auch deshalb zu - spannungsinduziertem - anisotropem Verhalten führen (Bild 13). Dieser Frage wird bei den folgenden Untersuchungen nachgegangen. Dazu ist die Kenntnis der in den Proben vorhandenen Strukturanisotropie erforderlich.

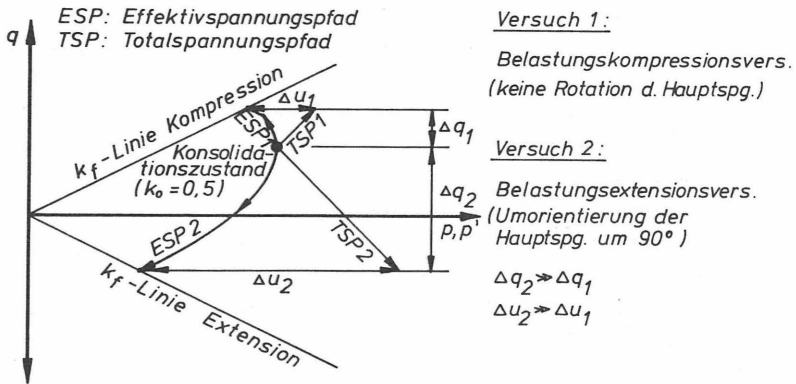


Bild 12: Kompressions- und Extensionsbelastung im undrainierten Versuch

	KOMPRESSION		EXTENSION	
	$\phi' (^{\circ})$	$c' \text{ (kPa)}$	$\phi' (^{\circ})$	$c' \text{ (kPa)}$
AMERASINGHE & PARRY Kaolin-Ton, gestört (1975)	23,2	0	35	0
BALASUBRAMANIAM verwittert. Ban- kok-Ton (1977)	24	38	25	56
MITACHI & KITAGO (1980)	28,1	0	25	56
VAID & CAMPANELLA ungest.sensit.Ton (1974)	25,2		34,3	
LADD et al gest. Boston-Ton (1971)	29		40	
UNIVERS.BRITITSH COL. (bei LADD et al, 1977) ungest.Ton	36,5		36,5	
DUNCAN & SEED ungest. Mudde (1966)	38		35	

Bild 13: Einfluß der Beanspruchungsart auf Scherparameter

Die Durchführung drainierter Triaxialversuche ist insbesondere bei überkonsolidierten Proben sehr langwierig. Aufgrund der Gültigkeit des Prinzips der effektiven Spannungen können auch undrainierte Versuche zur Bestimmung der Scherparameter für Endgrenzzustände verwendet werden. Unterschiede in den Scherparametern sind gemessen worden, bleiben aber sehr klein.

Die bei überverdichteten Böden zum Erreichen eines Grenzzustandes erforderliche Volumendehnung führt bei drainierten Versuchen im Bereich der Scherzone zu einer messbaren Volumendehnung. Diese Dilatanz (Volumendehnung aus Schubspannungsanteil) können undrainierte (Volumenkonstanz) Versuche nicht zeigen. Ein überverdichteter Ton kann also unter undrainierten Bedingungen keinen eindeutigen Bruchpunkt erreichen, solange sich die Probe homogen verformt.

Tatsächlich reagiert ein hoch überkonsolidierter Ton auf die verhinderte Volumendehnung durch messbare Porenwasserdruckabnahme, die bei größeren Dehnungen schließlich zu negativen Porenwasserdrücken führen kann. Der Effektivspannungspfad läuft dabei meist entlang der Einhüllenden der Bruchspannungspunkte. Tritt bei undrainierter Beanspruchung trotzdem ein Peak in der Arbeitslinie oder Spannungsspur auf, dann bei großen Verformungen mit den danneingetretenen Unstetigkeiten und inhomogenen Verzerrungen in der Probe.

Effektivspannungspfade besitzen je nach Grad der Überkonsolidation typische Formen (Bild 14), die durch die unterschiedlichen Porenwasserdruckentwicklungen zustandekommen.

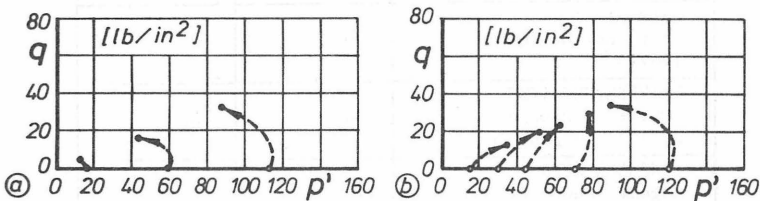


Bild 14: Effektivspannungspfade von normalkonsolidiertem (a) und auf 120 lb/in^2 (826 kPa) vorbelasteten Weald-Clay (nach LAMBE & WHITMAN, 1969)

HENKEL & WADE (1966) haben aufbauend auf SKEMPTON (1954) eine halbempirische Schätzgleichung für den Porenwasserüberdruck bei Belastung formuliert:

$$\Delta u = \Delta \sigma_{\text{oct}} + a \cdot \Delta \tau_{\text{oct}}$$

σ_{oct} und τ_{oct} sind dabei Schub- und Normalspannung auf der Oktaederfläche. Diese Darstellung ist invariant und deshalb ohne einschränkende Randbedingungen zu gebrauchen.

Der Porenwasserdruckbeiwert a in der Gleichung gibt die Porenwasserdruckänderung aus Schubbeanspruchung, Δu_s , an und ist deshalb ein qualitatives Maß für potentiell dilatantes oder kontraktantes Verhalten einer Probe im undrainierten Versuch. Für elastisch-isotropes Verhalten ist $a = 0$. Eine Zunahme von Δu_s (positiver a -Wert) zeigt an, daß die Probe unter der zugehörigen oktaedrischen Schubspannungsänderung eine Tendenz zu kontraktantem Verhalten zeigt, entsprechendes gilt für die Abnahme von Δu_s .

Die quantitative Ableitung eines Dilatanzmaßes ist hier ebenso wie bei drainierten Versuchen nicht möglich, da die Volumendehnung häufig nur in einem eng begrenzten Bereich, der Scherzone, stattfindet.

Die Neigung der Tone zu dilatantem oder kontraktantem Verhalten wird bei den folgenden Untersuchungen bewertet und mit den Gefügedaten interpretiert.

Belastung und Entlastung (Bruch durch Erhöhen oder Erniedrigen einer Hauptspannung) führen zu nach Betrag und Richtung gleichen Schubspannungen bei verschiedenen Totalspannungspfaden (Bild 11 und Bild 15). Bei homogenem, isotropen Material können für Be- und Entlastung gleiche Spannungspfade erwartet werden. Im Belastungsfall entsteht dabei ein Porenwasserüberdruck, im Entlastungsfall ein Porenwasserunterdruck. Dieser Unterdruck, der auch in-situ bei undrainierter (schneller) Entlastung auftritt, kann zu zeitweise größeren aufnehmbaren Schubspannungen ($s_u(\text{BK}, \text{EK})$ gegenüber $s_d(\text{EK})$ in Bild 15) führen.

Kennzeichnender Unterschied zwischen Versuchstypen ist die im einen Falle zunehmende, im anderen Falle abnehmende

mittlere Spannung p (Bild 15). Die Belastungsarten Kompressionsbelastung und -entlastung wie auch Extensionsbelastung und -entlastung treten bei fast jeder Beanspruchung im Grundbau auf.

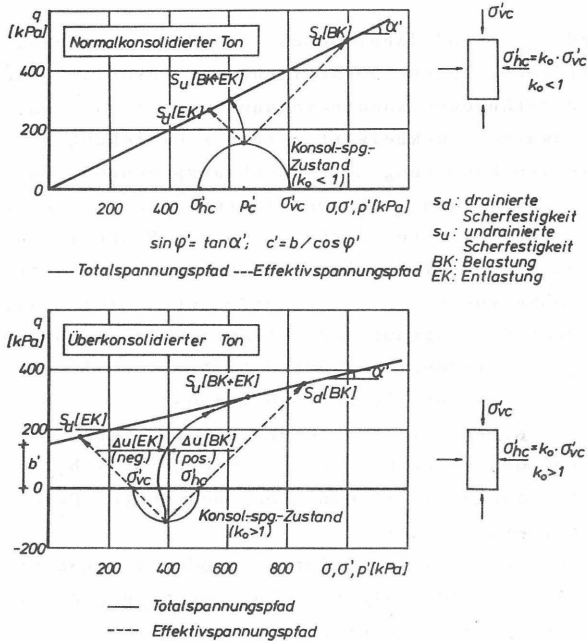


Bild 15: Spannungspfade von Be- und Entlastungskompressionsversuchen an normal- (a) und überkonsolidiertem (b) Ton

Der Einfluß der Belastungsart auf das mechanische Verhalten kann über spannungsinduzierte Anisotropie die Wirkung von Strukturanisotropien noch verstärken und wird hier verfolgt.

Anisotropes Verhalten kann im Triaxialversuch auch bei der Untersuchung von richtungsorientiert eingebauten Proben ermittelt werden (Bild 16).

Unter anderen haben DUNCAN & SEED (1966) und ATKINSON (1973) Bodenproben unterschiedlicher Entnahmerichtung untersucht und signifikante Unterschiede im Verformungsverhalten und bei den Grenzbedingungen festgestellt.

LAMBE & WHITMAN (1969) berichten über den Einfluß der Strukturanisotropie auf die Spannungspfadcharakteristik (Bild 16).

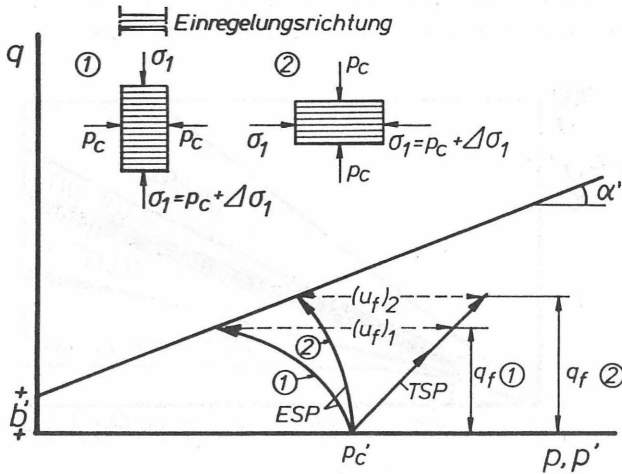


Bild 16: Spannungspfade von unterschiedlich eingebauten anisotropen Tonproben (nach LAMBE & WHITMAN)

GIBSON (1974) berichtet über Daten u.a. von WARD et al (1965) von mehr als 300 undrainierten Triaxialversuchen an "London Clay", bei denen je nach Entnahmerichtung teilweise Steifigkeitsunterschiede von mehr als 100% auftraten (Bild 17).

T (m)	Orientier.	E_{sek}	Proben- zahl	$E_{\text{sek}}^h / E_{\text{sek}}^v$
9	v	39,9	28	1,35
	h	54,1	24	
20	v	42,3	30	1,59
	h	88,0	20	
42	v	148,3	17	1,94
	h	288,2	12	

v=vertikal, h=horizontal; E_{sek} (MPa)

Bild 17: Sekantenmoduli aus undrainierten Scherversuchen an "London Clay" (nach WARD et al, 1965)

2.3 ZUSAMMENFASSUNG UND AUFGABENSTELLUNG

Aus den dargestellten Zusammenhängen läßt sich eine Reihe von Einflußfaktoren auf das mechanische Verhalten von überkonsolidierten Tönen ableiten.

Der Mineralbestand der Tone nimmt auf alle Bereiche (Gebrauchs- und Grenzzustände) Einfluß (Bild 18).

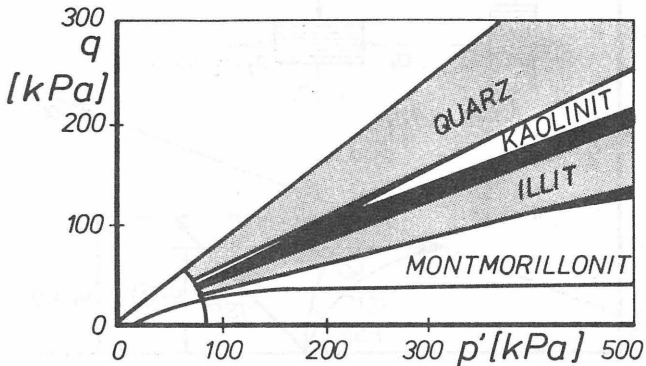


Bild 18: Qualitative Zusammenhänge zwischen Grenzzuständen und Mineraltypen (nach MITCHELL, 1976)

Die Primärgefüge von Tönen werden im Zuge der Diagenese mehr oder weniger stark verändert. Je nach Mineraltyp und Ausgangsgefüge kann es dabei zu Orientierungsverbesserungen bei den Tonteilchen kommen, die bis zu einer vollständigen Einregelung der meist plattigen Teilchen führen können. Die auf diese Weise entstehende Textur kann zu einem ausgeprägt anisotropen Verhalten der Tone bei Gebrauchs- und Grenzbelastung führen.

Bedeutsam für das bodenmechanische Verhalten können auch diagenetische Neubildungen oder Verfestigungen im Gefüge sein.

Erwartet werden kann schließlich auch ein Einfluß des letzten in-situ-Spannungszustandes, insbesondere dann, wenn die neue Belastung eine Hauptspannungsdrehung bedeutet.

Anisotropes Verhalten bei Überkonsolidation ist insbesondere für norddeutsche Tone kaum untersucht worden.

Dies gilt auch für den Einfluß von Gefügemerkmalen auf das mechanische Verhalten. Mit der parallelen, einheitlichen

mechanischen und gefügekundlichen Untersuchung von mehreren verschiedenen Tönen sollen im Folgenden Zusammenhänge erkannt werden. Auch der Einfluß von Gefügemerkmalen auf die Bestimmung bodenphysikalischer Grundkennwerte soll hier behandelt werden. Folgende Fragen sollen untersucht werden:

- a) Welche Besonderheiten zeigen die untersuchten Töne bei der bodenmechanischen Klassifikation ?
- b) Zeigen die Töne anisotropes Verhalten
- bei Zusammendrückung und Quellen (Gebrauchszustände) ?
- bei Bruchbelastung (Grenzzustände) ?
- c) Können Abhängigkeiten von der Beanspruchungsart bei Gebrauchs- und Grenzzuständen festgestellt werden ?
- d) Welche mineralogisch/geologischen Merkmale besitzen die Töne (Mineralbestand, Gefügeeinregelung, Primärspannungszustand) ?
- e) Können die beobachteten mechanischen Verhaltensweisen, im wesentlichen die Anisotropien bei Gebrauchs- und Grenzzuständen, mit den mineralogisch/geologischen Merkmalen interpretiert werden ?

Die Bearbeitung beginnt mit einer geologischen Kurzbeschreibung der untersuchten Töne.

3. UNTERSUCHTE TÖNE UND PROBENNAHMEN

3.1 AUSWAHL UND STRATIGRAPHISCHE EINORDNUNG

Die untersuchten Töne wurden nach 3 Kriterien ausgewählt. Erstes Kriterium war die Häufigkeit oberflächennahen Auftretens und damit die grundbautechnische Bedeutung des Tons. Das zweite und ausschlaggebende Kriterium war die geologische Differenzierbarkeit der Töne. Mit der getroffenen Auswahl sollte eine möglichst große, für den norddeutschen Raum typische, stratigraphische Bandbreite mit den zugehörigen mineralogischen, geologischen und bodenmechanischen Parametern und den unterschiedlichen Spannungsgeschichten abgedeckt werden.

Ein Problem bei der Auswahl entstand durch die beschränkten Möglichkeiten für die Gewinnung ungestörter Proben. Für die ausgewählten Formationen mußten jeweils geeignete Aufschlüsse gefunden werden. Daraus ergab sich ein drittes Auswahlkriterium.

Die verwendeten Tone werden in zwei Gruppen unterteilt
(Bild 19):

Gruppe I: komplettes Versuchsprogramm

Gruppe II: verkürztes Versuchsprogramm

Die kompletten Versuchsprogramme zum Festigkeits-
und Verformungsverhalten, zum Mineralbestand und Gefü-
ge konnten an 5, teilweise 6 Tonen (Grp. I) durchge-
führt werden.

Die ausgewählten Tone liegen stratigraphisch in den
Perioden:

Kreide -- Tertiär -- Quartär

	SYMBOL	BEZEICHNUNG	ENTNAHMEORT	ENTNAHMETIEFE
GRUPPE I	ME	Kreide-Ton	Mehrum	8 - 15 m
	SP	Oligozän-Ton	Sprendlingen	18 - 21 m
	HH	Miozän-Ton	Hamburg	30 - 66 m
	KI	Miozän-Ton	Kirchgellersen	8 - 10 m
	ED	Quartär-Ton	Edewecht	7 - 9 m
GRUPPE II	WO	Kreide-Ton	Woltorf	16 - 18 m
	AN	Kreide-Ton	Anderten	9 - 13 m
	QU	Quartär-Ton	Querenstede	14 - 16 m
	OD	Oligozän-Ton	Ochsendorf	3 - 4 m

Bild 19: Ausgewählte Tone mit Bezeichnung, Entnahme-
daten und im Folgenden verwendeter Kurzbe-
zeichnung (Symbol)

PERIODE	EPOCHE	Hinweise*	BEGINN vor Mio. Jahren**	unter- suchter Ton
Quartär	Holozän Pleistozän	Eis- und Schmelz- wasserabsätze von Nordosten		ED, QU
Jung- tertiär	Pliozän Miozän	anfangs marin, danach Land marin, mit Zwi- schenlandzeit	1.5 10	KI, HH
Alt- tertiär	Oligozän Eozän Paleozän	marin marin marin	25 37 58	SP, OD
	Landzeit		67	
Ober- kreide	Dan Maastricht Senon Turon Cenoman	marin marin Campan Santon Coniac marin marin***		WO AN
Unter- kreide	Alb Apt Barreme Hauterive Valendis	marin*** marin*** marin*** marin*** marin***	105	ME

- * nach GRIPP (1964)
 ** nach SCHMIDT (1974)
 *** örtlich transgredierend

Bild 20 : Abschnitt der erdgeschichtlichen Zeittafel
mit Zuordnung der untersuchten Tone

3.2 GEOLOGISCHE KURZBESCHREIBUNG

3.2.1 KREIDE-TONE

Die Sedimente der Kreide werden in Norddeutschland in vielen Gebieten oberflächennah angetroffen. Ihre Ablagerung begann vor ca. 140 Mio. Jahren (Bild 20). Nachdem es zu Beginn der Unterkreide beim Zurückweichen des Mitteleuropa bedeckenden Meeres zu Sedimentablagerungen unter limnischen Bedingungen (Wealden-Fazies) gekommen war, begann das Meer in der sich anschließenden Valendis-Epoche von Norden her erneut auch auf den norddeutschen Raum überzugreifen. In den folgenden Epochen der Unterkreide bis vor ca. 105 Mio. Jahren kamen in den Becken mächtige Tonlagen, nun wieder unter marinen Bedingungen, als Hils- und Neokom-Tone zum Absatz (u.a.: SCHMIDT, 1974). Liefergebiet der im niedersächsischen Becken abgelagerten Sedimente war überwiegend das Mitteldeutsche Festland.

3.2.1.1 AUFSCHLUSS MEHRUM

Der Aufschluß Mehrum, eine Doppelkernbohrung am Mittellandkanal bei km 195+100, erbrachte Ton der Unterkreide aus der Jacobi-Zone des Ober-Apt (KEMPER, 1977). Der Ton unterscheidet sich von den im Liegenden anstehenden Schichten durch einen geringeren Kalkgehalt. Untersucht wurden Proben aus 15 m bis 18 m Tiefe. Die Proben wurden sofort nach Erbohren am Ort dampfdiffusionssicher mit einem Unterdruck von etwa 0.8 bar eingeschweißt. In einer in unmittelbarer Nähe niedergebrachten zweiten Bohrung wurden Pressiometerversuche zur Messung der Horizontalspannung im Boden durchgeführt.

Angaben zur postsedimentären Auflast sind bei den Tönen der Unterkreide ausgesprochen schwierig, da die Mächtigkeiten der aufliegenden und später erodierten Sedimente nur sehr ungenau abgeschätzt werden können. Die Vorbelastung beträgt nach vorsichtigen Schätzungen zwischen 5 und 50 MPa. Einer Schätzung der Vorbelastung aus dem Ödometerversuch stehen u.a. der bei Sedimenten der Kreide häufig sehr hohe Kalkgehalt und die meist vorhandenen quellfähigen Tonminerale (BERNHARD, 1962) entgegen. Die im Quartär aufgetretenen Eisauflasten waren vergleichsweise gering und sind deshalb ohne Bedeutung.

3.2.1.2 AUFSCHLUSS WOLTORF

Der Aufschluß Woltorf liegt ebenfalls am Mittellandkanal bei km 209+000. Hier werden nach ERNST (1968) verschiedene Sedimente der Oberkreide angetroffen, deren genaue Altersstellung wegen eines genau bei km 209 anzutreffenden Transgressionshorizontes nicht ohne weiteres geklärt werden kann. In den Tonen der Oberkreide kann im allgemeinen ein höherer Kalkgehalt als in denen der Unterkreide erwartet werden. Im Hinblick auf Probennahme und Seitendrucksondierungen gelten die gleichen Anmerkungen wie beim Aufschluß Mehrum.

3.2.1.3 AUFSCHLUSS ANDERTEN

Der Aufschluß Anderten liegt östlich von Hannover am Mittellandkanal bei km 179+075.

Hier wurde ein Sediment der Oberkreide (Santon) erbohrt, das sich durch eine sehr starke diagenetische Verfestigung und eine helle Farbe von den übrigen Kreide-Tonen unterschied und aufgrund seines extrem hohen Kalkgehaltes auch als Tonmergel angesprochen wird. Das Material wurde von KHERA & SCHULZ (1981) untersucht und beschrieben. Auch hier gelten im Hinblick auf Probennahme und Seitendrucksondierungen die beim Aufschluß Mehrum gemachten Anmerkungen.

3.2.2 OLIGOZÄN-TONE

3.2.2.1 AUFSCHLUSS SPRENDLINGEN

Der untersuchte Rupel-Ton stammt aus einer Bohrung in der Nähe von Sprendlingen bei Bad Kreuznach, da ein für die Entnahme ungestörter Proben geeigneter Aufschluß im norddeutschen Raum nicht gefunden werden konnte.

Der Aufschluß liegt im Mainzer Becken, einem tertiären Senkungsfeld, das beim Einbruch des Rheintalgrabens entstand. Im Mitteloligozän kam es zu Meeresüberflutungen, in deren Verlauf im ruhigen Wasser der tieferen Beckenbereiche der Rupel-Ton (Rupel: nach dem Rupel-Tal, einer Lokalität in Belgien) in Mächtigkeiten zwischen 60 m und 120 m abgelagert wurde. Die häufig zu findende Bezeichnung "Septarienton" ist stratigraphisch nicht korrekt (FALKE, 1960).

Während der Untere und der Mittlere Rupel-Ton vermutlich unter marinen Bedingungen sedimentierten, kam es während der Ablagerung des Oberen Rupel-Tons zu häufigen Wechseln zwischen marinen, brackischen und limnischen Verhältnissen. Der in 17 m bis 20 m u. GOK (NN + 128 m) erbohrte Ton besitzt eine grauoliv bis blaugraue Farbe und ist steif bis halbfest bei ausgeprägter Plastizität. In Anlehnung an die bei FALKE (1960) gegebene Beschreibung kann der Ton mit einiger Sicherheit dem Oberen Rupel-Ton zugeordnet werden. Da der Rupel-Ton insgesamt nicht sehr gut aufgeschlossen ist, ist eine exakte stratigraphische Einordnung nicht möglich. Die Proben wurden nach Erbohren in gleicher Weise wie die Kreide-Tone behandelt.

Die Vorbelastung des Rupel-Tones, also die Belastung aus den pleistozänen Schotter-, Kies- und Sandablagerungen des Rheins kann im Südteil des Mainzer Beckens bei Mächtigkeiten bis 300 m maximal ca. 6 MPa betragen haben (STRUVE, 1973). Für den Raum Sprendlingen liegen keine Abschätzungen vor. Die momentane Auflast beträgt ca. 150 kPa.

Wegen des hohen Anteiles an feinverteiltem Kalk wird der Rupel-Ton häufig auch als Tonmergel angesprochen.

3.2.2.2 AUFSCHLUSS OCHSENDORF

Der Aufschluß Ochsendorf liegt zwischen Ochsendorf und Klein-Steimcke in der Nähe von Wolfsburg. Der hier anzutreffende graubraune, glimmerige Ton ist nach MESTWERDT (1914) dem Unteroligozän zuzurechnen. Das in einer Schürfgrube in 3 m bis 4 m freigelegte Material war stark verwittert, so daß ungestörte Proben nicht entnommen werden konnten. Der Ton wurde deshalb lediglich in Teile des Versuchsprogrammes mit einbezogen, eine eingehendere Beschreibung unterbleibt.

3.2.3 MIOZÄN-TONE

Die ins Jungtertiär gehörenden Sedimente des Miozäns wurden beim Zurückweichen des Meeres in seine heutigen Grenzen (Nordseebecken) in den Küstengebieten unter marinen Bedingungen abgelagert. Liefergebiet der hier untersuchten feinsandig-glimmerigen Tone war das fennoskandische Festland.

Die Korngröße der abgelagerten Sedimente wurde durch die sich laufend verändernde Küstenlinie der zumeist flachen See beeinflusst. Abgesetzte Sedimente wurden aus dem gleichen Grund oft wieder aufgearbeitet.

Die genaue Altersstellung der Sedimente des Miozäns ist über eine Analyse des Fossilienbestandes möglich, die hier jedoch nicht durchgeführt werden konnte.

Nach GRIPP (1964) wurden u.a. schluffig-tonige Feinsande und mit zunehmender Tiefe Glimmertone abgelagert, in denen Foraminiferen in großer Zahl auftreten können.

3.2.3.1 AUFSCHLUSS KIRCHGELLERSEN

Der Aufschluß Kirchgellersen, eine noch betriebene Tongrube, liegt westlich von Lüneburg, südlich von Winsen am Ortsausgang Kirchgellersen. Der dort gefundene Ton gehört vermutlich - in Anlehnung an Beschreibungen von GRIPP (1964) und HINSCH (1952) - in die Lüneburger Abteilung, eine Unterabteilung der Langenfelder Abteilung.

Die Proben wurden an einer seit längerer Zeit stehenden Böschung (Bild 27) mit einem Kernbohrgerät (Bohrdurchmesser 200 mm) erbohrt und vor Ort wie beim Kreide-Ton beschrieben weiterbehandelt.

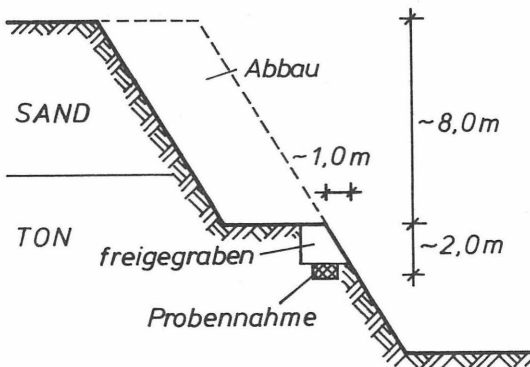


Bild 21: Entnahmesituation im Aufschluß Kirchgellersen

Die im Hangenden des Tones anstehenden Sande sind vermutlich Restsedimente der Warthe-Eiszeit. Ein Schätzung der maximalen

geostatischen Auflast gestaltet sich auch hier sehr schwierig. Die von den Eismassen der Elster-Eiszeit erodierte Pliozän-Decke war vermutlich von geringer Mächtigkeit, so daß die maximale Auflast mit großer Sicherheit ausschließlich durch die Eisüberfahrungen und die Sedimentfrachten des Eises gebildet wurde. Bei Annahme einer Wichte der Gletschermassen von ca. 14 kN/m^3 (Eis und Geröll) und einer Gletscherhöhe von etwa 300 m kann eine Auflast von 4.2 MPa errechnet werden. Da der Beprobungsbereich jedoch schon seit längerer Zeit oberflächennah liegt, ist es mit Sicherheit zu Entspannungsvorgängen gekommen, die bevorzugt in Richtung der geringsten Überdeckung, also hier in horizontaler Richtung, ablaufen konnten. Eine Aufnahme der Makrostruktur im Gelände ergab eine bevorzugte Lage von Trennflächen annähernd parallel zum Hang, die auf eine Auflockerung senkrecht zum Hang hindeutet.

3.2.3.2 AUFSCHLUSS HAMBURG

Die Proben aus dem Hamburger Aufschluß entstammen einer Seilkernbohrung im Bereich Köhlbrand im Hamburger Hafen. Dort stehen unter holozänen und pleistozänen Schichten Glimmerschluff und Glimmerton als Sedimente des Miozäns beginnend ab ca. 34 m unter Gelände an.

Die aus Tiefen unterhalb 35 m entnommenen Proben wurden vor Ort wie beim Aufschluß Mehrum beschrieben, behandelt. Klüfte, Schichten oder andere Inhomogenitäten konnten an den Proben nicht festgestellt werden.

Eine genaue Altersstellung des Beprobungsbereiches ist nicht möglich, da dazu die Unterlagen der von anderer Seite ausgeführten Bohrungen nicht ausreichen.

3.2.4 QUARTÄR-TONE

Sedimente des Quartärs sind im norddeutschen Raum häufig oberflächennah anzutreffen. Als Vertreter dieser Periode wurde hier Lauenburger Ton aus zwei Aufschlüssen untersucht. Der Lauenburger Ton entstand am Ende der Elster-Eiszeit und ist in Norddeutschland zwischen den Niederlanden und Mecklenburg in Mächtigkeiten bis 100 m anzutreffen.

SCHUCHT (1908) verwendete ihn als Leithorizont für das Pleistozän. Stratigraphisch handelt es sich um eine Bekkensedimentserie, die die Sedimentfolge der Elster-Eiszeit abschließt und durch eine weite Bandbreite der Faziestypen (fette, schwarze Tone; gebänderte Tone; Übergangsschichten; Verwitterungshorizonte) gekennzeichnet ist (RUPPERT, 1980). Die Beckenwässer besaßen, weil im Ton keine Fauna nachweisbar ist, vermutlich eine bedeutende Alkalinität, die auf Zutritt von Porenwasser aus Salzstockbereichen zurückgeführt wird (RUPPERT & SCHNEIDER, 1975).

Die gleichen Verfasser weisen darauf hin, daß die tonmineralogische Zusammensetzung der Lauenburger Tone weitgehend unabhängig von der faziiellen Ausbildung und der geographischen Lage ist und sich mit dem hohen Anteil an quellfähigen Tonmineralen (Smektit, Wechsellagerungsminerale) von anderen glazialen Sedimenten stark unterscheidet.

Über synsedimentäre Lagerungsstörungen, die im Lauenburger Ton häufig zu beobachten sind, berichtet RUPPERT (1980) ausführlich. Von Bedeutung ist die Beanspruchung der Sedimente durch das Saale-Glazial, wobei im Drenthe-Stadium das gesamte Verbreitungsgebiet überfahren wurde. Im Warthe-Stadium verlief die Grenze des Eisvorstoßes westlich von Hamburg, in der dritten den norddeutschen Raum betreffenden Eiszeit, dem Weichsel-Glazial, wurden nur die Gebiete östlich der Elbe betroffen. Neben der Druckwirkung der Gletscher trat durch ihre Bewegung auch eine Schubbeanspruchung auf, die sich insbesondere in der Makrostruktur nachweisen läßt. Nach BERNHARD (1962) betrug die Mächtigkeit des saaleeiszeitlichen Inlandeises im Raum Oldenburg ca. 380 m, so daß BERNHARD bei einer von ihm angenommenen Eisdichte von 10.5 kN/m^3 von einer maximalen Auflast von ca. 4000 kPa ausgeht. RUPPERT (1980) widerspricht dieser Schätzung und weist auf Untersuchungen hin, aus denen sich Auflasten von ca 475 kPa also etwa 50 bis 55 m Eis, ableiten (angenommene Eisdichte 9 kN/m^3 , also reines Eis).

Bei Betrachtung des Mineralbestandes (quellfähige Minerale) und des stets anzutreffenden Kluftgefüges mit den damit verbundenen Wasserwegsamkeiten im Ton kann angenommen werden, daß Quellvorgänge nicht nur in unmittelbarer Nähe der Ober-

fläche, sondern auch in größerer Tiefe eintraten und zu Veränderungen in der Porenzahl geführt haben. Die von RUPPERT (1980) vorgenommene Schätzung stellt deshalb eine untere Grenze für die Vorbelastung dar, kann aber der momentanen äquivalenten Spannung sehr nahe kommen.

3.2.4.1 AUFSCHLUSS QUERENSTEDE

Der Aufschluß ist eine an ein Klinkerwerk bei Bad Zwischenahn angeschlossene Tongrube. Dort steht der von RUPPERT (1980) als petrographische "Einheit 1" klassifizierte fette Ton an. Die Entnahme ungestörter Proben erwies sich in diesem Aufschluß als sehr schwierig, da an den Hängen Rutschungen erkennbar waren und die Grubensohle stark befahren wurde. Es wurden deshalb hier nur Proben für Klassifikationsversuche und unter hohem Aufwand einige Proben für Ödometerversuche genommen.

3.2.4.2 AUFSCHLUSS EDEWECHT

In diesem südwestlich von Oldenburg gelegenen Aufschluß gelang die Entnahme ungestörter Proben, wobei in ähnlicher Weise wie im Aufschluß Kirchgellersen vorgegangen wurde.

Auch hier wurde der "fette Ton" angetroffen, der sich hier durch ein grobes Kluftnetz auszeichnet, das beim Abbau des Tones zu quaderförmigen Bruchstücken von 5 bis 15 cm Kantenlänge führt.

Der Ton zeigte allerdings keine massige, sondern eine eher lagige Struktur, so daß er eine Zwischenstufe zwischen den Faziestypen "gebändert" und "fett, massig" (RUPPERT, 1980) darstellt.

4. BODENMECHANISCHE KLASSIFIKATION

4.1 KORNERTEILUNG

Bei der Bestimmung der Korngrößenverteilung wurde der bei überkonsolidierten Tonen als bedeutsam erachtete Einfluß der Aufbereitungsart untersucht. Dabei kamen die Verfahren "Standardverfahren nach DIN 18123", "2-wöchige Wasserlagerung",

"Ultraschallbehandlung", "Vorbehandlung mit H_2O_2 " zur Anwendung. Von der Ultraschallbehandlung wurde bei den sehr stark verdichteten Tonen ein relativ weitgehender Aufschluß der Aggregate erwartet. WETZEL (1950) hat gezeigt, daß bei nicht zu hoher Beschallungsenergie die Trennung von Ton-
teilchen gelingt, ohne daß diese oder kleine Fossilien zerstört werden.

Über diese verschiedenen Aufbereitungsmethoden hinaus wurde zur Bestimmung der Korngrößenverteilung ein weiteres Verfahren angewendet. Bei diesem kombinierten Verfahren wurde nach einer kurzen Ultraschallbehandlung der sorgfältig aufgeschlämmten Probe die Fraktion $> 63 \mu m$ durch Naßsiegung abgetrennt. In der Zentrifuge erfolgte anschließend die Trennung der Fraktionen $> 2 \mu m$ (Bodensatz) von den Fraktionen $< 2 \mu m$ (Trübe). Die Fraktionen $> 2 \mu m$ wurden dann mit der Pipettmethode und die Fraktionen $< 2 \mu m$ durch Zentrifugieren weiter getrennt. Die vorgenommene statistische Auswertung der Ergebnisse dieses Analyseverfahrens liefert bessere Erkenntnisse zum Aufbau des Sedimentes als das in der Bodenmechanik übliche Standardverfahren. Die Berechnungsmethode sowie Vergleichswerte wurden von FOLK & WARD (1957) angegeben.

In einer Vorversuchsphase ergab sich übereinstimmend an allen einbezogenen Tonen, daß die mit Ultraschall behandelten Proben gegenüber den mit anderen Aufbereitungsmethoden behandelten Proben den größten Tongehalt zeigten (Bild 22), mit Ultraschall also am besten aufgeschlossen werden konnten. Die durch die Ultraschallbehandlung im Vergleich zum Standardverfahren eingetretenen Werteänderungen sind, wie eine Darstellung im Körnungsdreieck zeigt, relativ groß. Die Änderungen im gemessenen Tongehalt betragen bezogen auf den Tongehalt der normal behandelten Probe zwischen 5.5 % (OD) und 45.2 % (QU), so daß Fehlbeurteilungen sehr leicht eintreten können (Bild 24).

Die sedimentologische Untersuchung mit der oben beschriebenen, vorwiegend in der Ingenieurgeologie und Mineralogie verwendeten Methode liefert zusätzliche Informationen über die Tone (Bild 23). Treten mehrere charakteristische Korngrößenpopulationen in einem Sediment auf, so wird dies in der

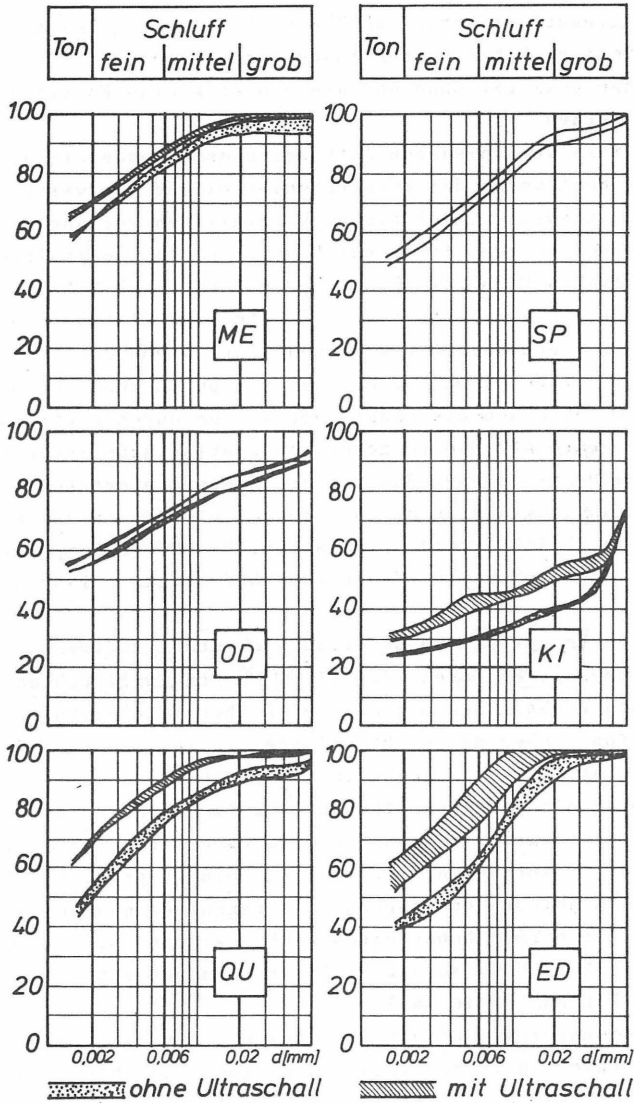


Bild 22: Kornverteilungskurven der Tone vor und nach der Ultraschallbehandlung

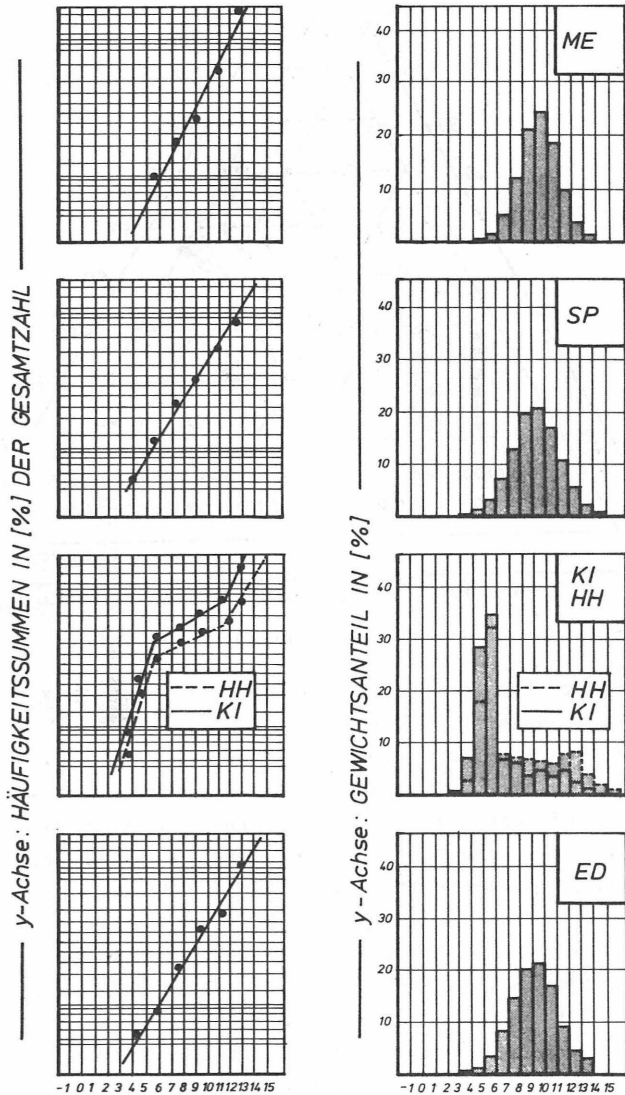


Bild 23: Auswertung der Kornverteilung nach FOLK & WARD,
links: Häufigkeit/ $\phi = \log_2(d)$ auf Wahrscheinlich-
keitspapier
rechts: Histogramme

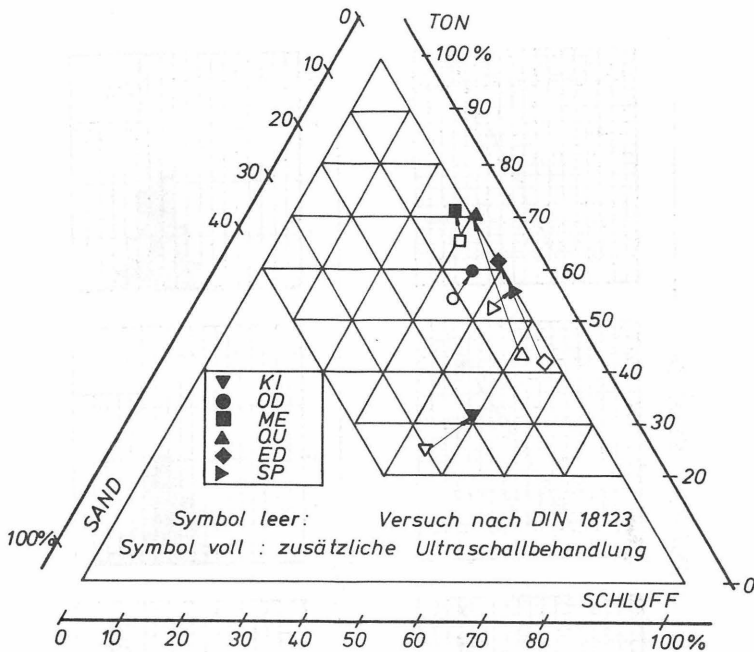


Bild 24: Versuchsspuren im Körnungsdreieck

Darstellung Massenprozent/Korngrößen (siehe FOLK & WARD, 1957) auf Wahrscheinlichkeitspapier durch einzelne Geraden deutlich sichtbar. Die Auftragungsmethode ist eine visuelle Untersuchung auf Normalverteilung. Sind die Korngrößen in einem Sediment normalverteilt, stellt sich in dieser Darstellung eine Gerade ein. Die Tone ME, SP und ED besitzen eindeutig normalverteilte Korngrößen (Bild 23). Die beiden Miozän-Tone HH und KI hingegen können nicht als Tone im sedimentologischen Sinne bezeichnet werden, da ihre Hauptbodenart Schluff ist (Bild 22). Aus Bild 23 geht zusätzlich hervor, daß beide Tone aus 3 Populationen bestehen. Die Ursache dieser Besonderheit der Miozän-Tone kann mit den ingenieurgeologischen Untersuchungen (Punkt 8.1) geklärt werden.

4.2 KORNDICHTE

Die Korndichtenbestimmung wurde nach DIN 18124 mit dem Kapillarpyknometer durchgeführt (Bild 25).

	n	ρ_s ohne US (t/m ³)	ρ_s mit US (t/m ³)
ME	6	2,71	2,64
SP	2	2,77	2,77
OD	6	2,71	2,69
KI	6	2,71	2,64
ED	6	2,61	2,62
QU	6	2,56	2,51

n: Anzahl der Einzelversuche
US: Ultraschallbehandlung

Bild 25: Ergebnisse der Korndichtenbestimmung

Die Ergebnisse der Korndichtenbestimmung an ultraschallbehandelten Proben zeigten eine deutlich geringere Streuung, so daß die Behandlung offensichtlich zu einer gleichmäßigen Aufbereitung beiträgt. Daß die Korndichten behandelter Proben geringer sind, muß zunächst überraschen, da mit abnehmender Teilchengröße im allgemeinen ein Anstieg der Korndichte beobachtet wird (KEZDI, 1969). Eine Erklärung, die allerdings einer weiteren Absicherung bedarf, könnte darin bestehen, daß kleinere Teilchen aufgrund eines eventuell vorhandenen größeren Luftadsorptionsvermögens mit den üblichen Verfahren nicht ausreichend entlüftet werden können.

4.3 DICHTe, WASSERGEHALT UND PORENZAHl

Porenzahl, Dichte und Wassergehalt wurden im Zuge der Ödomet- und Scherversuche stets bestimmt. Die Methoden sind in den betreffenden Normen festgelegt. Die erhaltenen Kennwerte sind vorab in der Tabelle "Bodenkennwerte" (Bild 26) enthalten.

4.4 KONSISTENZGRENZEN UND FOLGEWERTE

Die Bestimmung der Konsistenzgrenzen (hier: Fließgrenze w_L , Ausrollgrenze w_p) und der Folgewerte (Plastizitätszahl I_p ,

Konsistenzzahl I_C , Aktivitätszahl I_A) geschah nach DIN 18122. Die Ergebnisse sind in Bild 26 eingetragen. Dabei wurden die Mittelwerte aus den Ergebnissen von Versuchen mit unterschiedlichen Aufbereitungsmethoden verwendet.

Neben u.a. der hohen Plastizität des Unterkreide-Tons ME fällt die bei allen Kennwerten zu beobachtende sehr große Ähnlichkeit der beiden Tonmergel AN (Oberkreide) und SP (Rupelton) auf.

4.5 KALKGEHALT UND GLÜHVERLUST

Kalkgehalt V_{ca} und organischer Anteil (Glühverlust) V_{gl} werden in der Bodenmechanik mit sehr einfachen und groben Verfahren ermittelt, deren Fehler bodenabhängig und weitgehend unbestimmbar sind. Trotzdem können sie als Orientierungswerte dienen. Die betreffenden Werte sind in Bild 26 eingetragen. Eine Beurteilung wird im Zusammenhang mit den Untersuchungen unter Punkt 7.1 und 8.1 durchgeführt.

	T (%)	U (%)	S (%)	e (-)	w (%)	w_L (%)	w_P (%)	I_P (%)	I_C (-)	I_A (-)	V_{ca} (%)	V_{gl} (%)
ME	67	31	2	0,60	21	112	20	92	0,99	1,37	1,3	6,7
WO	68	30	2	0,75	27	76	21	55	0,95	0,81	18,2	18,8
AN	50	45	5	0,51	20	48	15	32	0,89	0,64	60,5	24,5
SP	50	47	3	0,55	23	58	19	39	0,90	0,78	17,6	15,1
OD	57	35	8	--	23	65	19	46	0,91	0,81	1,0	6,2
HH	29	61	10	0,40	15	49	16	33	1,03	1,14	1,5	6,0
KI	29	46	25	0,55	19	46	17	29	0,93	1,00	2,1	4,9
ED	62	36	2	0,87	31	84	26	58	0,91	0,94	6,0	11,9
QU	51	48	1	0,90	35	81	28	53	0,91	0,81	7,0	13,0

Bild 26: Grundkennwerte der untersuchten Tone

4.6 ZUSAMMENHÄNGE UND BEWERTUNG

Die Eintragung der Tone in das Plastizitätsdiagramm von CASAGRANDE (Bild 27) zeigt, daß mit Ausnahme der Miozän-Tone alle Tone als ausgeprägt plastisch einzustufen sind. Auch die Miozän-Tone nähern sich bei längerer Aufbereitungszeit (längerem Wasserangebot) diesem Bereich. Dieser zunächst überraschende Effekt soll mit den ingenieurgeologischen Untersuchungen geklärt werden.

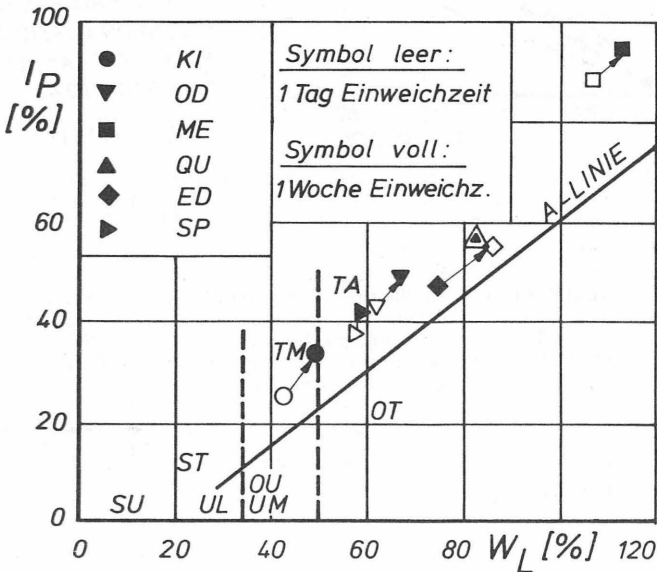


Bild 27: Plastizitätsdiagramm nach CASAGRANDE

Einen Vergleich der hier untersuchten Tone mit anderen ermöglicht Bild 28. Dort sind von SKEMPTON (1953) angegebene Untersuchungsergebnisse unterschiedlichster Tone in einem Plastizitäts-Tongehalts-Diagramm zusammen mit den hier gewonnenen Ergebnissen eingetragen. Die Steigungen der eingetragenen Linien stellen typische Aktivitätszahlen dar. Bild 28 zeigt, daß der Unterkreide-Ton ME eine für Tone vergleichbaren Alters nicht typische hohe Aktivität besitzt, während der Oberkreide-Ton AN mit einem I_A -Wert von 0.63 dem WEALD-CLAY und die Miozäne dem eozänen LONDON-CLAY ähnlich sind.

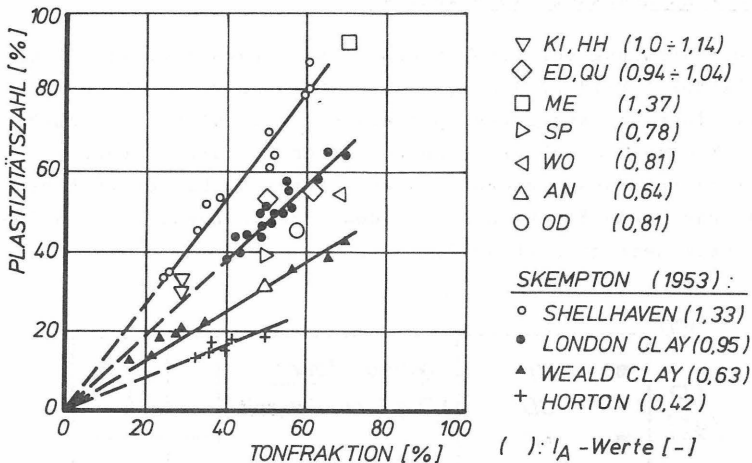


Bild 28: Zusammenhang zwischen Plastizitätszahl und Tonfraktion nach SKEMPTON (1953); zusätzlich eingetragen: Werte der hier untersuchten Tone

SHELLHAVEN : organischer postglazialer Ton mit Illit und Montmorillonit

WEALD CLAY : am Übergang Jura-Kreide unter limnischen Bedingungen sed. Ton mit Illit, Kaolinit

LONDON CLAY: eozäner, mariner Ton mit Illit, Montmorillonit

HORTON CLAY: postglazialer, mariner Ton mit Quarz, Muskovit, Illit und Montmorillonit

Die in der Literatur häufig betonte Abhängigkeit der Fließgrenze und der Plastizität vom Tongehalt ist auch hier signifikant (Bild 29).

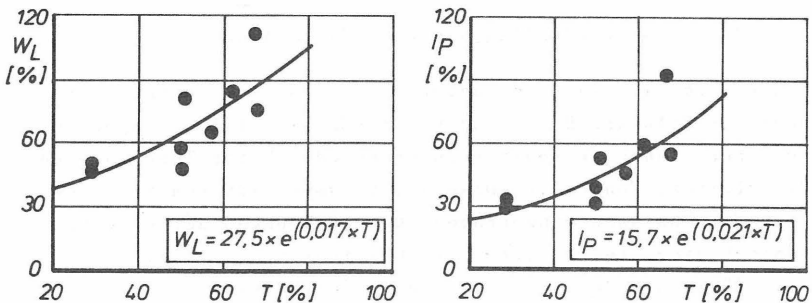


Bild 29: Fließgrenze w_L und Plastizitätszahl I_P als Funktion des Tongehaltes

Der vermutete Zusammenhang zwischen der Änderung des Tongehaltes durch Ultraschallbehandlung und dem Kalkgehalt der Tone konnte nachgewiesen werden (Bild 30). Für die Tone mit Kalkgehalten unter 10 % ergab sich ein eindeutiger Zusammenhang. Für die kalkreicheren Tone AN und SP bestätigte sich die Abhängigkeit nicht.

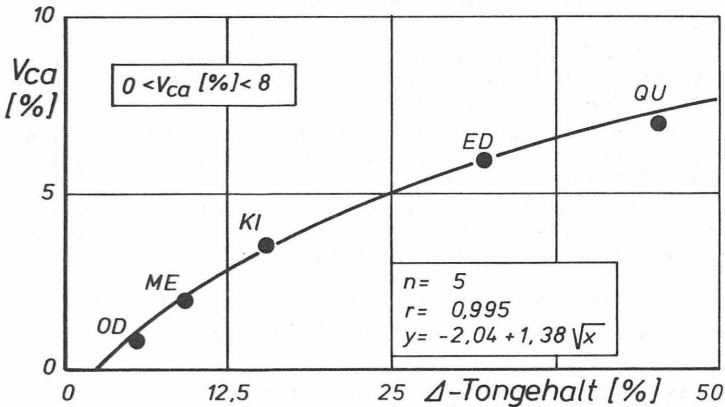


Bild 30: Zusammenhang zwischen Tongehaltsänderung aus Ultraschallbehandlung und Kalkgehalt (Scheibler-Gerät)
Tongehaltsänderung bezogen auf den Wert nach Standarduntersuchung

Der Kalkgehalt erhöht durch die positive Ladung der Ca^{++} -Ionen und die damit mögliche Brückenbildung zwischen einzelnen Tonteilchen die Festigkeit des Tones durch Aggregationswirkungen. Diese Bindungen können offensichtlich mit den üblichen Aufbereitungsverfahren nur teilweise gelöst werden, sehr wohl aber mit einer Ultraschallbehandlung. Bei hohen Kalkgehalten liegt der Kalk häufig in Konkretionen im Porenraum vor, so daß der Einfluß auf die Tongehaltsänderung möglicherweise deshalb bei den betroffenen Tönen geringer ist. Eine Beurteilung dieses Effektes ist ohne Gefügeuntersuchungen nicht möglich und wird unter Punkt 8.1 durchgeführt. Wichtigstes Ergebnis der Klassifikationsuntersuchungen im Hinblick auf das mechanische Verhalten der Tone ist die mit der Ultraschallbehandlung aufgedeckte unterschiedliche Aggregatisierung der Tone. Im einzelnen können folgende Beobachtungen festgehalten werden:

K-1: Die Korngrößen der Tone sind normalverteilt. Lediglich die beiden Miozän-Tone zeigen eine auffällige Teilung der Korngrößen in 3 Fraktionen.

K-2: Eine Behandlung der Tone mit Ultraschall führt zu höheren messbaren Tonanteilen. Dieser Effekt ist für die Beurteilung der Aktivität, Plastizität, Zusammendrückbarkeit und des Quellverhaltens von Bedeutung. Der Einfluß der Ultraschallbehandlung ist überraschenderweise bei dem jüngsten, dem Lauenburger Ton, am stärksten und bei dem ältesten untersuchten Ton, dem Unterkreide-Ton ME, vergleichsweise gering.

K-3: Die Tone sind mit Ausnahme der Miozän-Tone ausgeprägt plastisch. Auch diese können bei längerer Aufbereitungszeit als ausgeprägt plastisch erscheinen.

K-4: Der Unterkreide-Ton ME zeigt die höchste Plastizitäts- und Aktivitätszahl, gefolgt vom Lauenburger Ton (I_p) und von den Miozän-Tonen (I_A).

K-5: Bei Kalkgehalten unter 10 % kann ein Zusammenhang zwischen der Tongehaltsänderung durch Ultraschallbehandlung und dem Kalkgehalt eindeutig festgestellt werden.

Die Beobachtungen werden zusammen mit den ingenieurgeologischen Untersuchungen unter Punkt 8 interpretiert.

5. ZUSAMMENDRÜCKUNGS- UND QUELLVERHALTEN

5.1 VERSUCHSGERÄTE UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Untersuchungen zum Zusammendrückungs- und Quellverhalten wurden in Ödometern mit einem Probendurchmesser von 7 cm und einer Probenhöhe von 1.4 cm durchgeführt. Alle Versuche wurden unabhängig von probentypischen Konsolidationszeiten in einem 24-Std.-Rhythmus oder 12-Std.-Rhythmus belastet. Das gewählte Belastungsprogramm unterschied sich von dem bei SCHULTZE & MUHS (1967) empfohlenen Verfahren durch kleinere Spannungsdifferenzen zwischen den Laststufen. Damit sollten Krümmungsänderungen in den Drucksetzungslinien genauer erfaßt werden.

Die Proben wurden nicht geflutet, sondern nur vor der Austrocknung geschützt, Zeitsetzungslinien wurden bei 2 Laststufen aufgenommen. Die Ödometerringe wurden bei allen Versuchen mit einem Gleitmittel behandelt, um die Mantelreibung zu vermindern. An den Proben wurden für Ein- und Ausbauzustand die Kennwerte Dichte, Wassergehalt, Porenzahl und Sättigungszahl bestimmt. Um die beim Ödometerversuch insbesondere bei steifen bis halbfesten Proben zu erwartenden Einflüsse durch

zufällige Fehler zu vermindern, wurden in allen Fällen mehrere Versuche unter gleichen Randbedingungen gefahren und die Ergebnisse gemittelt.

Die Auswertung des Zeitsetzungsverhaltens erwies sich als ausgesprochen schwierig, da die Tone sich bei den verwendeten Druckspannungen fast in allen Fällen im Wiederbelastungsbereich befanden und deshalb kein charakteristisches Konsolidationsverhalten zeigten. Auf die Ermittlung von Konsolidationszeiten wurde deshalb verzichtet.

Ähnlich wie auch bei den Klassifikationsversuchen konnten bei den Ödometerversuchen anders als bei den aufwendigeren Triaxialversuchen insgesamt 7 Tone in 36 Einzelversuchen untersucht werden.

Das Versuchsprogramm schloß eine Variation der Entnahmerichtung ein ($\beta = 0^\circ, 90^\circ$; siehe Bild 31).

Aufgrund der unter Punkt 2.2.3 beschriebenen Beobachtungen von ZEEVART und FROSS wurden zusätzlich bei 4 Tönen Versuche an aufbereiteten und rekonsolidierten sowie an resedimentierten und rekonsolidierten Proben gefahren.

Schließlich wurden noch Quellversuche an richtungsorientiert entnommenen ungestörten Proben durchgeführt.

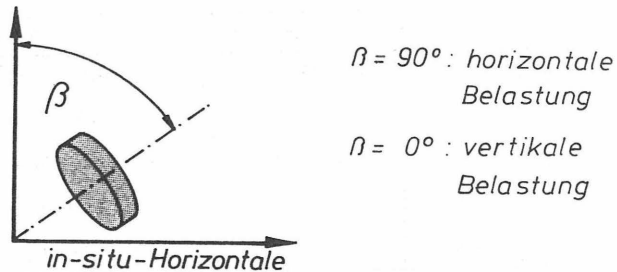


Bild 31: Belastungsrichtungen der Ödometerproben

Für die Versuche an gestörten Proben wurde das Material mit einem Wassergehalt nahe der Fließgrenze aufbereitet und homogenisiert. Anschließend konnten die Proben bei zweiseitiger Drainage unter Erdruchdruckbedingungen konsolidieren. Dann wurde wie bei den ungestörten Proben weiter verfahren.

Bei Herstellung der sedimentierten Proben, einem Vorgang, der teilweise längere Zeit in Anspruch nahm, wurde bei den in

marinem Milieu sedimentierten Tonen ein geschätzter Salzgehalt des Wassers eingestellt. Auch beim Lauenburger Ton wurde so, wenn auch abgeschwächt, verfahren. Nach der Sedimentation wurden die Proben in den Behältern, die für diesen Zweck hergestellt wurden, bis zu einer Spannung von ca. 130 kPa vorbelastet und dann im Ödometer weiter untersucht.

Die Quellversuche wurden an ungestörten Proben von 4 Tonen bei unterschiedlicher Entnahmerichtung ausgeführt. Dabei wurden im Ödometer bei voller Flutung der Bauteile und Probe die auftretenden Quelldehnungen unter 0,02 mm gehalten. Nach Beobachtung von Druckkonstanz wurde in Stufen entlastet und die zugehörige Dehnung gemessen.

5.2 VERSUCHSERGEBNISSE

5.2.1 VORBELASTUNGEN UND ÄQUIVALENTE SPANNUNGEN

Die an den ungestörten Proben nach dem Verfahren von CASA-GRANDE (1936) ermittelten Vorbelastungsspannungen σ'_{ov} sind deutlich geringer als die geschätzte maximale geostatische Auflast σ_{vm}^* (Bild 32).

	KI	HH	ED	ME	SP	WO	AN	QU
T_e (m)	2,0	66,0	1,5	8,0	20,0	17,0	9,5	1,5
T_1 (m)	10,0	66,0	8,0	8,0	20,0	17,0	9,5	15,0
σ_{vm}^* (MPa)	4,0	4,0	4,0	5,0	6,0	5,0	5,0	4,0
σ'_{ov} (MPa)	1,45	-	0,33	0,35	0,42	0,46	0,95	0,51
σ'_{oh} (MPa)	1,0	-	0,34	0,43	0,58	0,52	1,15	0,55

σ_{vm}^* : über Literaturauswertung erhaltene Abschätzung der maximalen geostatischen Auflast (Mindestwerte)

HH : die σ'_o - Spannungen sind aus gerätetechnischen Gründen nicht bestimmbar

T_e : Entnahmetiefe unter momentaner GOK

T_1 : langfristige Tiefe unter ursprünglicher GOK

Bild 32: Vorbelastungsspannungen der untersuchten Tone

Die Einordnung der Tone in den von LAMBE & WHITMAN (1969) angegebenen, empirisch gefundenen, halbquantitativen Zusammenhang $e = f(\sigma, I_p)$ mit σ als Überlagerungsspannung (Bild 33) ergibt, daß die Tone durchweg höheren maximalen Spannungen ausgesetzt waren, als im Versuch ermittelt wurden (σ'_0 -Werte).

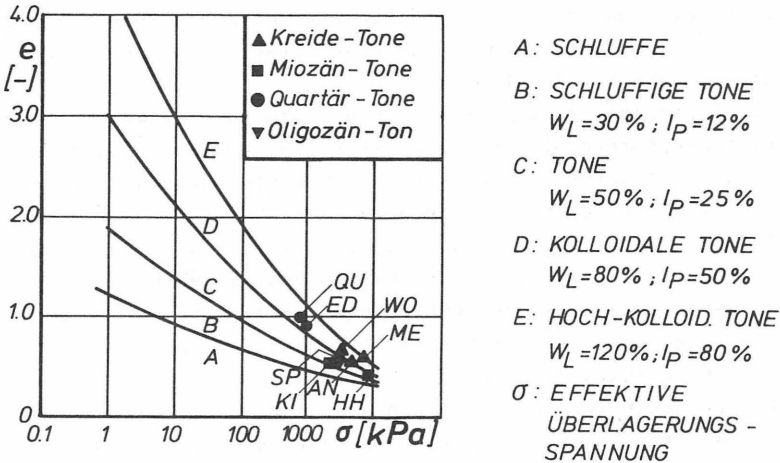


Bild 33: Zusammenhang Porenzahl/Überlagerungsspannung nach LAMBE & WHITMAN (1969) zusammen mit den hier untersuchten Tonen

Wird unterstellt, daß die aufbereiteten und rekonsolidierten Proben den gleichen Kompressionsbeiwert

$$C_c = (e - e_0) / \ln(\sigma' / \sigma'_0)$$

wie die Tone während ihrer Erstbelastung in-situ besitzen, dann kann über

$$\ln(\sigma'_e) = \ln(\sigma'_0) - (e - e_0) / C_c$$

eine der momentanen, in-situ vorhandenen Porenzahl e äquivalente Spannung σ_e berechnet werden. Das Wertepaar σ'_0 / e_0 beschreibt dabei einen beliebigen Meßpunkt im Erstbelastungsbereich der betreffenden Versuchskurve.

Diese Berechnung wurde für 4 Tone durchgeführt. Die errechneten Spannungen σ_e (Bild 24) waren so niedrig, daß zusätzliche

Versuche an sedimentierten Proben durchgeführt wurden. Von der Auswertung dieser zusätzlichen Versuche wurden vertrauenswürdiger Ergebnisse erwartet, da die sedimentierten Proben vermutlich ein realistischeres Primärgefüge aufwiesen als die nur aufbereiteten Proben. Die errechneten, zur momentanen Porenzahl äquivalenten Spannungen sind bei diesen Proben dann auch tatsächlich deutlich höher (Bild 34).

Eine Bewertung dieser Unterschiede wird im Zusammenhang mit den auch an diesen Proben durchgeführten Gefügeuntersuchungen unter Punkt 8.2 durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen bereits hier, daß zur Erzeugung der momentanen Porenzahlen der Tone sehr viel höhere Spannungen erforderlich waren, als die aus den Ödometerversuchen ermittelten "Vorbelastungen" anzeigen. Bei der Bewertung der äquivalenten Spannungen ist jedoch zu beachten, daß die Porenzahlen der Tone nicht nur durch Druckwirkungen, sondern auch durch diagenetische Neu- oder Umbildungen vermindert werden können. Die Bedeutung dieses Effektes wird nach den Untersuchungen zu Mineralbestand und Gefüge beurteilt.

Die großen Unterschiede zwischen geologischer, geschätzter Vorbelastung, äquivalenter Spannung (aus Versuchen an sedimentierten Proben) und an ungestörten Proben ermittelten Vorbelastungen (Ödometerversuch) sind sicher auch auf die gerade bei steifen bis halbfesten Tönen auftretenden Probenstörungen bei Entnahme, Bearbeitung und Einbau zurückzuführen. Diese Störungen müssen sich beim Ödometerversuch besonders auswirken, da die Horizontalspannungen im Versuch und damit auch die ermittelten Verformungen sehr stark von der Kraftschlüssigkeit Probe/Ring bei Versuchsbeginn abhängen. Eine weitere Ursache für die beobachteten Unterschiede zwischen den charakteristischen Spannungen besteht darin, daß sich die Tone trotz der nach wie vor geringen Porenzahl zur Geländeoberfläche hin bevorzugt entspannt haben. Dies ergibt sich aus der bei allen Tönen mit Ausnahme des Miozän-Tones KI größeren horizontalen als vertikalen Vorbelastung. Diese Betrachtung kann jedoch nur bei weitgehend isotropem Gefüge richtig sein, da bei anisotropem Gefüge neben dem eingprägten Spannungszustand auch die gestaltliche Anisotropie im Versuch erfasst wird.

	ungestörter Ton						aufbereiteter Ton					sedimentierter Ton				
	e	C _s	Quelldruck		Quellhebg		C _c	C _s	σ _o	e _o	σ _e	C _c	C _s	σ _o	e _o	σ _e
			0°	90°	0°	90°										
ME	0,58	0,029	170	115	11,0	7,7	0,167	0,085	10	1,42	1,46	0,17	0,179	10	1,72	8,63
SP	0,60	0,026	96	35	3,3	2,8	0,361	---	10	2,16	0,76	0,25	0,295	10	1,94	2,17
HH	0,40	0,004	30	20	1,3	1,5	0,103	0,027	10	0,91	1,40	0,07	0,029	10	0,93	19,95
KI	0,51	0,004	--	--	---	---	0,105	0,016	10	0,93	0,56	--	---	--	--	---
ED	0,87	0,028	0	0	0,0	0,0	0,18	0,032	10	0,86	0,27	0,4	0,133	10	2,60	0,78

Quelldrücke (kPa); äquivalente Spannungen (MPa); C_s, C_c, e (-); --- : nicht bestimmt
 Quellhebung (%)

Bild 34: Ergebnisse der Zusammendrückungs- und Quellversuche

Eine Auftragung des Zusammenhanges $\alpha_{kl} = f(e)$ mit

$$\alpha_{kl} = \sigma'_{\bar{o}} (\beta=90^\circ) / \sigma'_{\bar{o}} (\beta=0^\circ) = \sigma'_{\bar{o}h} / \sigma'_{\bar{o}v}$$

zeigt, daß mit zunehmender Porenzahl generell auch eine Annahme der Anisotropie in den ermittelten Vorbelastungswerten einhergeht (Bild 35).

Die Ermittlung der Vorbelastungen an den gestörten und mit $\sigma = 130$ kPa rekonsolidierten Proben ergab Verhältniswerte α_{kl} deutlich unter 1.0. Dieses Ergebnis zeigt, daß bei Normalkonsolidation die Zusammendrückung in horizontaler Richtung aufgrund der in dieser Richtung um den Faktor K_o geringeren Vorspannung bei allen untersuchten Tönen erwartungsgemäß und in Übereinstimmung u.a. mit FROSS (1972) und KHE-RA & SCHULZ (1981) größer als in vertikaler Richtung ist (siehe Punkt 2.2.3). Die entgegengesetzte Beobachtung bei den ungestörten Proben kann deshalb nur auf die Spannungsgeschichte der Tone und das Gefüge zurückgeführt werden.

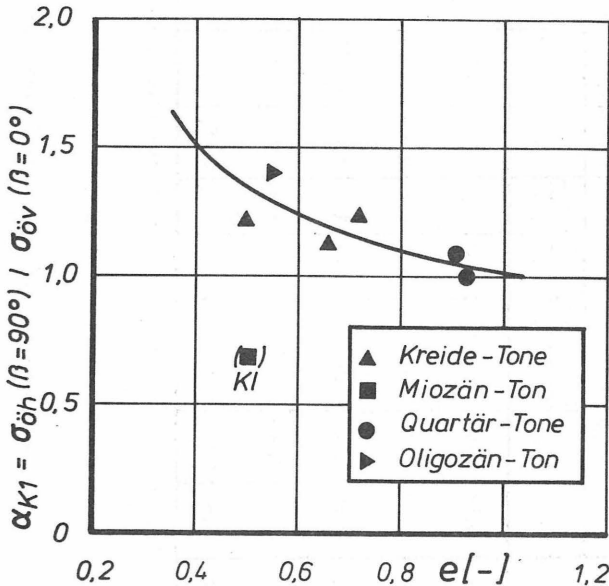


Bild 35: Verhältnis der Vorbelastungswerte aus Ödometerversuchen als Funktion der Porenzahl

Dies wird unterstrichen durch die Tatsache, daß der Miozän-Ton KI, der sich bevorzugt in horizontaler Richtung entspan-

nen konnte, in dieser Richtung auch eine geringere Vorbelastung zeigt (Bild 32).

Die dargestellten Beobachtungen können mit der Porenzahl als richtungsunabhängiger Größe nicht mehr interpretiert werden und sollen deshalb nach Untersuchung des Gefüges diskutiert werden.

Das von ZEEVART (1953) für die Abschätzung von K_0 verwendete Verhältnis α_{kl} zeigt hier Werte von 0.7 (KI) über 1.0 (ED, QU) und 1.2 (ME) bis 1.4 (SP). Angesichts der vermutlich vorhandenen gestaltlichen Anisotropie der Tone wird mit diesen Verhältniswerten jedoch auch Gefügeanisotropie gemessen und nicht nur ein Eigenspannungszustand. Auf diese Frage wird nach Untersuchung des Gefüges weiter eingegangen.

5.2.2 QUELLVERHALTEN

Die Quellversuche wurden an den Tönen ME, SP, HH und ED durchgeführt. Die ermittelten Quelldrücke (Bild 34) sind allgemein in vertikaler Richtung größer als in horizontaler Richtung, eine Beobachtung, die mit Gefügeuntersuchungen überprüft werden wird.

Der Unterkreide-Ton ME zeigt die mit Abstand höchsten Quelldrücke und Quelldehnungen (bei Wegnahme der Druckspannung), gefolgt vom Rupel-Ton SP und Miozän-Ton HH. Der Lauenburger Ton ED zeigt keinerlei Quellverhalten, was darauf hindeutet, daß er in-situ bereits weitgehend ausquellen konnte und dabei seine Porenzahl um einen unbekannten Betrag erhöht hat. Die hohe Quellfähigkeit des Lauenburger Tons wird durch den an sedimentierten Proben ermittelten hohen Schwellbeiwert C_s (Bild 34, Vergleichswerte siehe GUDEHUS, 1981, Tab. 4.1) der hier nur von dem des Tones ME übertroffen wird, unterstrichen. Das Quellverhalten der Tone wird nach Untersuchung von Mineralbestand und Gefüge interpretiert.

5.2.3 STEIFIGKEITEN

Die Steifigkeiten der Tone unterscheiden sich erwartungsgemäß sehr stark, wie der Vergleich der Steifemoduli für den Spannungsbereich 1.5 bis 2 MPa zeigt (Bild 36).

Für eine weitergehende Betrachtung der Zusammendrückung in

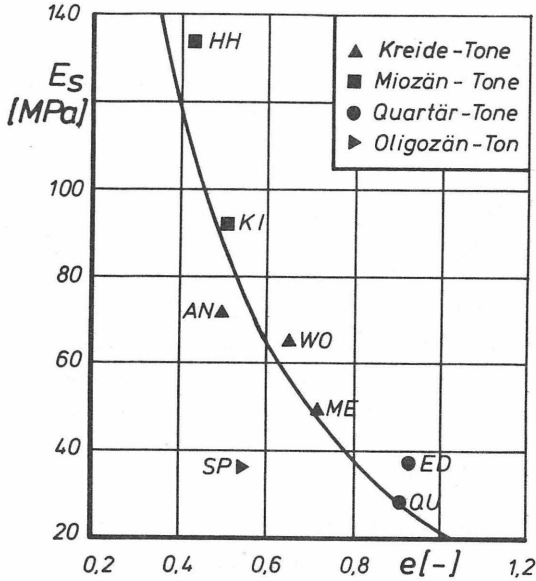


Bild 36: Zusammenhang zwischen den Steifemoduli der Tone im Spannungsbereich zwischen 1,5 und 2 MPa und der Potenzzahl

horizontaler und vertikaler Richtung wird das Verhältnis

$$\alpha_{k2} = E_s(\beta=90^\circ) / E_s(\beta=0^\circ)$$

definiert und auf Abhängigkeit von der aufgetragenen Versuchsspannung untersucht.

Die gestört eingebauten und mit $\sigma' = 130$ kPa rekonsolidierten Proben zeigen ein Verhalten, das sich bis zum Bereich der Rekonsolidationsspannung durch kleine, aber mit σ'_v (Versuchsspannung) stark zunehmende α_{k2} -Werte, also zunächst sehr große horizontale Zusammendrückbarkeiten auszeichnet. Im Bereich der Rekonsolidationsspannung beginnen die α_{k2} -Werte einem Grenzwert asymptotisch zuzustreben, der bei den Tönen HH, KI bei 1,03, bei den plastischeren Tönen ME und ED bei 0,9 bzw. 0,8 liegt (Bild 37). Die Miozän-Tone verhalten sich bei Spannungen oberhalb der Rekonsolidationsspannung also nahezu isotrop.

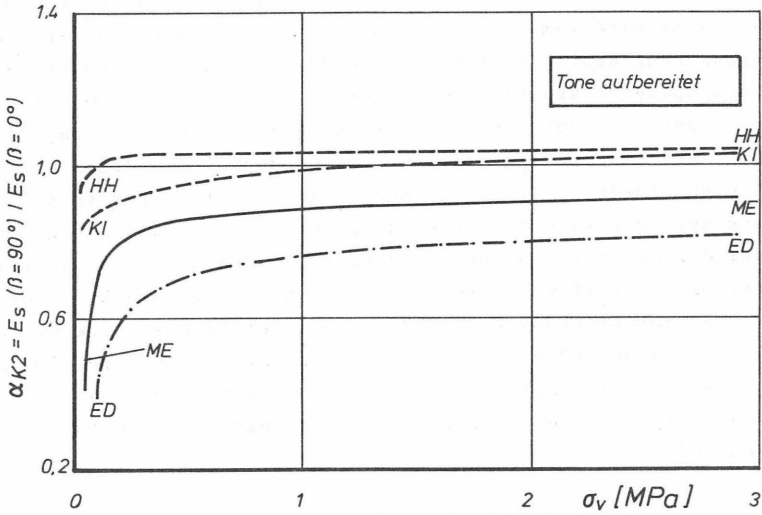


Bild 37: Verhältnis der Steifemoduli als Funktion der Versuchsspannung (gestörte Proben)

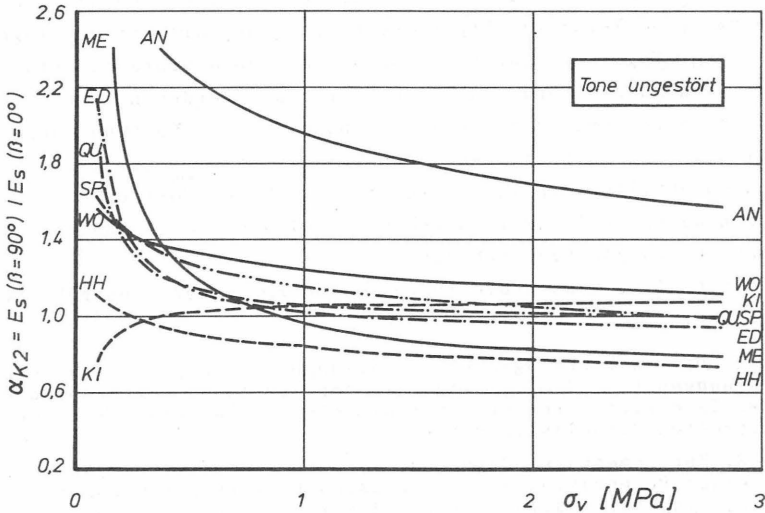


Bild 38: Verhältnis der Steifemoduli als Funktion der Versuchsspannung (ungestörte Proben)

Im Gegensatz zu dem an den gestörten und rekonsolidierten, also normalkonsolidiert vorliegenden Proben erzielten Ergebnis wird bei der Betrachtung der ungestörten Proben ein

anderes Verhalten sichtbar (Bild 38). Die Tone zeigen, mit Ausnahme wiederum des miozänen Tons KI, bei kleinen Versuchsspannungen deutlich über 1 liegende und mit zunehmender Versuchsspannung abnehmende α_{k2} -Werte, also zunächst eine viel geringere Zusammendrückbarkeit in horizontaler Richtung. Auch hier streben die α_{k2} -Werte Grenzwerten um 1 zu, die aber nur von den Tönen mit geringen ödometrisch ermittelten Vorbela-stungen in etwa erreicht werden. Der Kreide-Ton AN zeigt auch bei der maximalen Gerätespannung von 3 MPa noch eine deutlich geringere Steifigkeit in vertikaler Richtung gegenüber der horizontalen Richtung (Bild 38). Die kalkreichen Tone der Oberkreide AN und WO sowie der ebenfalls kalkreiche Rupel-Ton SP zeigen flachere Kurven, die auf höhere Vorbelastungen und kalkbegünstigte diagenetische Stabilisierungen ihres Gefüges hindeuten.

5.3 BEOBACHTETE BESONDERHEITEN

Die Versuche zum Zusammendrückungsverhalten und Quellverhalten haben eine Reihe von Ergebnissen erbracht, die mit den ingenieurgeologischen Untersuchungen zum Mineralbestand, Gefüge und den in-situ-Spannungen interpretiert werden sollen.

Wichtigstes Ergebnis ist die beobachtete, im Spannungsbereich bis 300 kPa insgesamt sehr hohe Anisotropie im Zusammendrückungsverhalten der Tone, die an den höheren horizontalen als vertikalen Steifigkeiten erkennbar wird und die signifikant vom Spannungsniveau abhängt.

Im einzelnen können die folgenden Beobachtungen festgehalten werden:

Z-1: Die nach geologischen Schätzungen und empirischen Untersuchungen (Bild 32) anzunehmenden maximalen Vorbelastungen der Tone sind durchweg höher als die aus Ödometerversuchen ermittelten Vorbelastungswerte.

Z-2: Zur momentanen Porenzahl in-situ äquivalente Spannungen, die aus Porenzahlen und Kompressionsbeiwerten berechnet wurden, sind für sedimentierte und belastete Proben höher als für lediglich aufbereitete Proben und auch höher als die an ungestörten Proben im Ödometer ermittelten Vorbelastungswerte. Die so ermittelten äquivalenten Spannungen kommen den Spannungen, die die momentan in-situ vorhandenen Porenzahlen erzeugt haben, am nächsten. Sie können aber zu hoch sein, wenn andere Wirkungen als Druck zu einer Porenzahlverminderung führen konnten.

Z-3: Die häufig als Vorbelastung interpretierten Spannungen am

Knickpunkt der Drucksetzungslinien aus Ödometerversuchen sind für horizontal belastete ungestörte Proben im Gegensatz zu den gestörten Proben höher als für vertikale (üblich) Belastung (Ausnahme: KI), was auf eine Gefügeanisotropie hindeutet. Der Unterschied nimmt mit wachsender Porenzahl, also abnehmender Dichte, ab.

Z-4: Der Quelldruck ist bei den betroffenen Tönen in vertikaler Richtung stets größer als in horizontaler Richtung. Der Quelldruck und auch die Quelldehnungen sind bei dem Unterkreide-Ton ME am größten, der Lauenburger Ton zeigt trotz ähnlichem Schwellbeiwert im ungestörten Zustand keinerlei Quellerscheinungen.

Z-5: Tone mit höherer Porenzahl besitzen geringere Steifigkeiten. Dieser zu erwartende Zusammenhang zeigt bei den hier untersuchten Tönen eine sehr geringe Streuung (Ausnahme: SP).

Z-6: Die Zusammendrückbarkeit gestörter, gering vorkonsolidierter Proben ist bis zum Erreichen der Rekonsolidationsspannung in horizontaler Richtung größer als in vertikaler Richtung. Bei größeren Druckspannungen wird ein Verhältnis um 1 erreicht.

Z-7: Die Zusammendrückbarkeit ungestörter, überkonsolidierter Proben ist zunächst in horizontaler Richtung sehr viel geringer als in vertikaler Richtung (größere Steifigkeit horizontal). Das Verhältnis nimmt erst bei größeren Spannungen, je nach Ausgangsporenzahl, auf einen Wert um 1 ab. Die Kurven der kalkreicheren Tone verlaufen dabei flacher, der Mioxän-Ton KI zeigt ein bereits gedeutetes, entgegengesetztes Verhalten.

Die Tone verhalten sich hoch anisotrop. Die Anisotropie ist sehr stark vom Spannungszustand abhängig und bei kleinen Spannungen besonders ausgeprägt.

6. FESTIGKEITS- UND VERFORMUNGSVERHALTEN

6.1 VORBEMERKUNGEN

Die zu untersuchenden Tone wurden in Triaxialversuchen auf ihr Verhalten bei Grenzbeanspruchung geprüft. In der Konsolidationsphase der Versuche konnten dabei weitere Informationen zum Zusammendrückungsverhalten (Gebrauchszustände) erhalten werden.

Das Verhalten bei Grenzbelastung (Belastung mit absolut wachsendem Deviator q bei zu- oder abnehmendem mittleren Druck p) wurde an zylindrischen Bodenproben des Durchmessers 3.6 cm und der Höhe 7 cm bzw. 9 cm untersucht. Verwendet wurden 2 Versuchsanlagen. Mit der vorhandenen Anlage für Standardversuche nach DIN 18137 Teil 2 (Entwurf) wurden Proben unterschiedlicher Entnahmerichtung untersucht. Die zweite Anlage diente Versuchen mit verschiedenen Spannungspfaden.

6.2 TRIAXIALVERSUCHE MIT VERSCHIEDENEN SPANNUNGSPFADEN

6.2.1 VERSUCHSANLAGE

Die Versuchsanlage für die Versuche mit verschiedenen Spannungspfaden wurde im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut und eingefahren. Vorhanden war eine mechanische Anlage für handbetriebene Standardversuche.

Die Anlage besteht aus den Teilen:

- 3 Versuchsstände mit Zellen und Belastungseinheiten
- Meßgeber und Verstärkungseinheiten
- Prozeßrechner mit Peripheriegeräten für Datenerfassung, Steuerung und Ausgabe

Wesentliche Merkmale der verwendeten Zellen (Bild 39) sind:

- Probendurchmesser = Stempeldurchmesser (3.57 cm)
- Probenhöhe 7 cm
- Parallelführung des Belastungsstempels (zentrische Belastung)
- Verminderung der Endflächenreibung durch verbreiterte, polierte und geschmierte Endplatten
- Drainage der Proben durch Filterstreifen auf dem Probenmantel hin zum Filterstein zwischen oberer Kopfplatte und Belastungsstempel und durch einen zentralen Filterstein ($d=4\text{mm}$) in der oberen Kopfplatte. Mit der Umfangsdrainage wird ein weitgehend axialsymmetrischer Porenwasserdruckgradient erreicht, die Drainagestrecken sind relativ kurz (gleiches gilt für die Sättigungsstrecken)
- Porenwasserdruckmessung während der Konsolidation über den in der Sockelplatte zentrisch angeordneten kleinen Filterstein mit steifer Verbindung zum Druckaufnehmer, für die Probenachse repräsentative Messung
- Porenwasserdruckmessung während undrainierter Versuche über Kopf- und Sockelfilterstein und volumenkonstante Verbindungsleitungen
- Verwendung von Glycerin als Zellflüssigkeit, dadurch keine Schwierigkeiten mit Luftdiffusion in die Probe, die bei Vorversuchen trotz entlüftetem Wasser nach ein bis zwei Wochen regelmäßig auftrat
- durch Verwendung einer doppelten Gummihülle mit Silikonfettzwischenlage Ausschließen eines denkbaren Einflusses des hygroskopischen Glycerins auf Porenwasser und die Druckmessung
- Messung der Axialkraft im Sockel, genaue Regelung auf diese Weise möglich (Stempelreibung ausgeschlossen)
- Messung der Volumenänderung über das ausgepresste Porenwasser
- verfügbare Axialkraft: 4 kN
- verfügbarer Zelldruck: 1100 kPa (11 bar)

Die Zelle mit den wesentlichen Details ist in Bild 39 dargestellt. Die Radialspannung, bei dieser Zelle identisch mit

dem Zelldruck, wird je Stand über eine unabhängige Druckregelereinheit der Fa. VIA, Düsseldorf, gesteuert. Die Einheit besteht aus Schrittmotor, Getriebe und Druckregler. Die Axialkraft wird je Stand über einen Schrittmotor mit nachgeschaltetem Untersetzungsgetriebe und einer ausgleichend und dämpfend wirkenden Federeinheit weitgehend querkraftfrei an den Belastungsstempel gebracht.

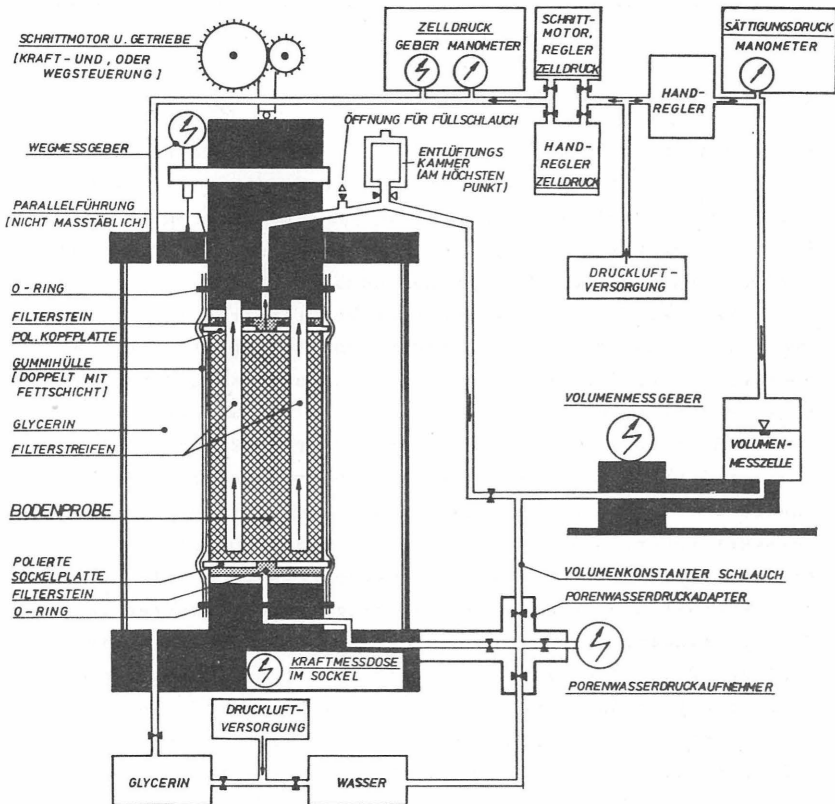


Bild 39: Schemazeichnung der Zelle mit wesentlichen Details

6.2.2 DATENERFASSUNG

Pro Versuchsstand werden jeweils 5 Messwerte (Bild 40) mit elektronischen Meßgebern erfaßt.

Geber	Bezeichnung	System	Nennlast	Genauigkeit
1	Kraftmessdose	DMS	5 kN	0,1 N
2	Zelldruckaufnehmer	DMS	2 MPa	0,1 kPa
3	Wegaufnehmer	INDUKT:	20 mm	0,0005 mm
4	Porenwasserdruckaufn.	DMS	2 MPa	0,1 kPa
5	Wägezelle	DMS	900 ml	0,01 ml

Die angegebenen Genauigkeiten sind die der Messketten

Bild 40: Meßwertaufnehmer und Genauigkeiten

Bei den Aufnehmern 1 bis 4 handelt es sich um Messgeber der Fa. Hottinger und Baldwin, Darmstadt (C-2/500, P-3-M-20, W-2/10). Die Volumenänderungen werden über Wägezellen der Fa. K.-H. Stiriz, Hamburg, durch Wiegen von unter Druck stehendem ausgedrückten Porenwasser gemessen.

Jedem Messgeber ist ein geeigneter Verstärker des gleichen Herstellers nachgeschaltet. Neben den 15 Meßwerten werden noch die Temperatur gemessen und Datum und Uhrzeit von einer externen Uhr gelesen.

An der Schnittstelle zwischen Verstärkerblock und Multiprogrammer (Systemgerät zur Aufnahme unterschiedlichster Einschübe für verschiedene Funktionen) stehen insgesamt 16 messwertproportionale Spannungen (0 bis ± 10 Volt bzw. 0 bis ± 1 Volt) an. Über die rechnergesteuerte Schaltung von je 2 kontaktlosen Relais auf den Eingangsrelaiskarten im Multiprogrammer werden die einzelnen Meßsignale potentialfrei zum Digitalvoltmeter durchgeschaltet und dort nach rechnergesteuerter Anpassung des Messbereiches mit 5 oder 6-stelliger Genauigkeit digitalisiert und vom Rechner abgerufen (Bild 41). Der Rechner ermittelt aus den 5 Meßdaten je Stand laufend Folgewerte, die dann in der Versuchssteuerung benötigt werden. Solche Folgewerte sind: σ_a , σ_r , q, p, Δu , $\Delta V/V_0$, A. Diese Werte werden laufend aktualisiert.

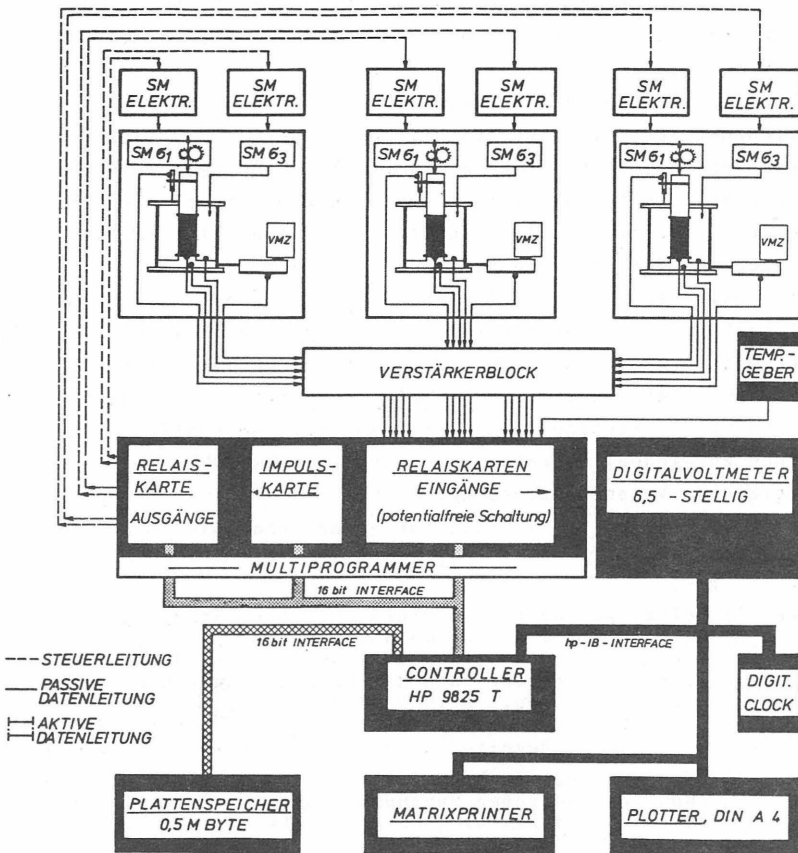


Bild 41: Schemazeichnung der Versuchsanlage mit Datenerfassungs- und Ausgabeeinheiten

Da die Versuchsanlage in einem klimatisierten Raum ($17^{\circ} \pm 0.3^{\circ} \text{ C}$) betrieben wird, brauchte eine Korrektur temperaturempfindlicher Geber nicht mehr vorgenommen zu werden.

6.2.3 STEUERUNG

Zentrales Gerät der Anlage ist ein Tischrechner hp 9825 T der Fa. Hewlett Packard mit 64 kByte Read/Write-Speicher, der

über Interfaceleitungen mit den Peripheriegeräten zur Datenerfassung und zur Ausgabe verbunden ist. Die Steuerung der Versuche wurde über die beiden Programme DIALOG (ca. 30 kByte) und KONTROL (ca. 35 kByte) durchgeführt. In DIALOG werden zunächst die gespeicherten Nullwerte der 15 Meßgeber zugeladen und mit den aktuellen Nullwerten verglichen (Kontrolle auf Ausfall von Komponenten), anschließend werden im Dialogbetrieb sämtliche versuchsbegleitenden Daten und die für die Versuchssteuerung erforderlichen Parameter - Steuervariable - eingelesen und ebenfalls im Dialogbetrieb die Proben eingebaut. Auf diese Weise ist eine Kontrolle der axialen Belastung bei Einbau möglich. Durch den Dialogbetrieb werden Einbaufehler weitgehend vermieden. Die Steuerparameter können im Versuchsablauf bei Bedarf im "life-keyboard"-Betrieb jederzeit verändert werden. Nach Abschluß des Probeneinbaus wird das Programm KONTROL automatisch zugeladen, übernimmt die Daten aus DIALOG und die nun beginnende Versuchssteuerung. Von KONTROL wird der Versuch für jeden Stand wie folgt gesteuert:

- PFAD 1: Sofortiges Aufregeln eines isotropen Spannungszustandes von 100 kPa in kürzester Zeit
(entspricht in etwa dem Spannungszustand bei Transport und Lagerung nach der Unterdruckverpackung)
Pfad 1, bis Punkt B in Bild 42
Ziel: Behinderung von Quellvorgängen, Kraftschluß, keine Regelvorgänge bei sehr kleinen Spannungen
Sättigung bei Punkt B (Bild 42), automatische Erhöhung des isotropen Spannungszustandes bei Auftreten eines Quellmaßes um jeweils 20 kPa
- PFAD 2: Anfahren des ersten Spannungspunktes C auf der K-Linie
(K = vorgewähltes Hauptspannungsverhältnis für die Konsolidation)
- PFAD 3: Konsolidieren entlang der K-Linie bis zum vorgesehenen endgültigen Konsolidationsspannungspunkt D
- PFAD 4: Abscheren, undrainiert, auf einem vorgewählten Spannungspfad

Die Steuerung des Versuches wird grundsätzlich in p-q-Koordinaten vorgenommen, wobei das Programm zunächst den momentanen Pfad identifiziert und aus den vorab berechneten Koordinaten der Anfangs- und Endpunkte der Einzelpfade die Koor-

dinaten von Zwischenpunkten errechnet und als aktuelle Zielgrößen in die Steuer- und Regelschleifen einführt.

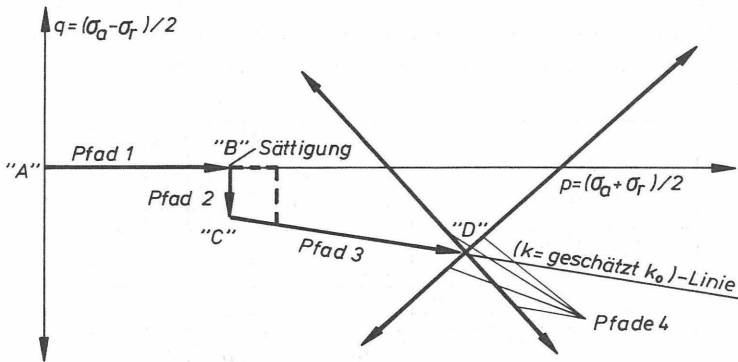


Bild 42: Versuchsablauf, dargestellt mit totalen Spannungspfaden

Die Versuchsgeschwindigkeit richtet sich dabei innerhalb einer unteren und einer oberen Grenze nach den Reaktionen der Probe. So wird zum Beispiel in der Konsolidationsphase nach Aufregeln eines inkrementellen Spannungsbetrages vor dem nächsten Belastungsschritt zunächst abgewartet, bis der eventuell entstandene Porenwasserüberdruck wieder abgeklungen ist oder eine eventuell auftretende Volumenänderung zum Stillstand gekommen ist, wobei sich als Kriterium für Meßwertkonstanz die Messwerte über eine in den Steuerdaten festgelegte Zeit um nicht mehr als einen ebenfalls dort für jedes Messignal festgelegten Betrag ändern dürfen.

In der undrainierten Scherphase wird entsprechend verfahren. In der Bruchphase wird vom Programm auf eine Wegsteuerung umgeschaltet.

Sämtliche Regel- und Steuervorgänge werden in kleinstmöglichen Schritten, hier 2 kPa, durchgeführt. Unabhängig von den eigentlichen Steuerungsvorgängen (gezielte Spannungsänderungen) werden die jeweils maßgeblichen Sollwerte über "Regelungen" eingehalten.

Da die 3 Versuchsstände im laufenden Wechsel angesteuert

werden und unterschiedliche Versuchsphasen je Stand möglich sein müssen, wird eine STATUSMATRIX benötigt (Bild 43), in der der Zustand eines jeden Standes (z.B.: in Betrieb, Störung, Versuchsende, aktueller Pfad etc.) festgehalten wird und abrufbar ist. Erst diese Verfahrensweise ermöglicht unabhängige Versuche an mehreren Versuchsständen und gestattet beliebige Programmerweiterungen und -änderungen.

VERSUCHSPHASE		Festlegung durch	STATUS-STRING F						
			Phas. Kennzahl	1 Pfad 1	2 Pfad 2	3 Pfad 3	4 Pfad 4	5 Sättig.	6 Betrieb 0/1
VERSUCHSSTART		Dateneingabe	0	0	0	0	0	0	1
PFAD 1	Start + Lauf	Programm	1	1	0	0	0	0	1
	Ziel erreicht	Programm	1	2	0	0	0	0	1
SÄTTIGUNG	Start + Lauf	Programm	2	2	0	0	0	1	1
	Ende	Fkt.-Key	2	2	0	0	0	2	1
	Sätt.stufe	Fkt.-Key	2	2	0	0	0	3	1
	Sätt.Test	Fkt.-Key	2	2	0	0	0	4	1
PFAD 2	Start + Lauf	Programm	1	2	1	0	0	2	1
	Ziel erreicht	Programm	1	2	2	0	0	2	1
PFAD 3	Start + Lauf	Programm	1	2	2	1	0	2	1
	Ziel erreicht	Programm	1	2	2	3	0	2	1
	Pfad 4 Beginn	Fkt.-Key	1	2	2	2	0	2	1
PFAD 4	Start + Lauf	Programm	1	2	2	2	1	2	1
	Bruchbereich	Programm	1	2	2	2	3	2	1
	Impulssteuerung	Programm	1	2	2	2	4	2	1
	Ende Pfad 4	Progr./Fkt.-K.	0	2	2	2	2	2	1

Bild 43: Statusmatrix für Versuchsphasenidentifikation

Um eine Meßwertkonstanz beobachten zu können, wird eine Datenmatrix benötigt, in der zurückliegende Meßwerte gespeichert sind. Mit der hier verwendeten ROLLMATRIX werden jeweils 6 Meßwertsätze pro Stand mit einem vorgewählten Zeitabstand für derartige Abfragen auf Konstanz vorgehalten. Die Meßwertzeilen in diesem Feld werden in einem an die Versuchsphase gekoppelten Zeitrhythmus umsortiert. Die Steuerung der beiden Hauptspannungen wird über Schrittmotoren vorgenommen, wobei Steuerinkremente vom Programm aus den erfassten Daten ermittelt und in Schrittmotorimpulse umgerechnet werden. Der Schrittmotorkarte im Multiprogrammer (Bild 41) wird nach Schalten des betreffenden Ausganges

die Erzeugung und Absendung der Impulse über eine Interfaceleitung aufgegeben. Die Schrittmotorelektronik arbeitet die Impulse dann unabhängig ab.

Das Regelziel wird dabei in Schritten mit jeweils der halben Differenz zum Zielwert angesteuert, wobei nach jedem Schritt diese Differenz neu festgestellt wird. Durch diesen Ablauf wird ein Regelziel mit größtmöglicher Schnelligkeit ohne Überschreitung bei laufender Zwischenkontrolle erreicht. Ein versuchsbegleitender Datenausdruck (Bild 44) und ein Begleitplot ermöglichen eine intensive Kontrolle während des laufenden Versuchs. Im 5-min-Abstand wird als Netzausfallsicherung der gesamte Rechner-Kernspeicherinhalt einschließlich aller Zustandsgrößen und Daten auf Diskette gespeichert, so daß eine Versuchsreihe nach kurzfristigen Netzausfällen oder dem Austausch einer defekten Anlagenkomponente jederzeit wieder aufnehmbar ist.

Tag	Min	Zeit	dT	eps	Sig1	Sig3	S3/S1	q	p	dv	dV	Flaeche	
Std		[min]	[K]	[Z]	kPa	kPa	i	kPa	kPa	kPa	n1	[cm2]	
13	13	11	8625	18.18	0.108	373.7	359.4	0.96	7.1	366.6	24.2	-0.188	10.0475
13	13	11	8625	18.18	0.108	374.0	359.6	0.96	7.2	366.8	24.0	-0.188	10.0475
13	13	12	8626	18.18	0.108	374.3	359.9	0.96	7.2	367.1	24.3	-0.188	10.0475
13	13	12	8626	18.18	0.110	378.3	359.9	0.95	9.2	369.1	24.6	-0.188	10.0478
13	13	12	8626	18.18	0.111	378.2	360.0	0.95	9.1	369.1	24.7	-0.188	10.0478
13	13	13	8626	18.19	0.111	378.2	360.0	0.95	9.1	369.1	24.8	-0.188	10.0478
13	13	13	8627	18.19	0.112	378.6	359.9	0.95	9.3	369.3	24.9	-0.188	10.0479
13	13	13	8627	18.19	0.112	378.5	359.9	0.95	9.3	369.2	25.0	-0.188	10.0479
13	13	13	8627	18.19	0.112	378.4	359.9	0.95	9.2	369.1	25.1	-0.188	10.0479
13	13	14	8628	18.18	0.112	378.3	359.9	0.95	9.2	369.1	25.1	-0.188	10.0479
13	13	14	8628	18.18	0.112	378.2	359.9	0.95	9.1	369.1	25.2	-0.188	10.0479
13	13	14	8628	18.19	0.112	378.7	359.9	0.95	9.4	369.3	25.4	-0.188	10.0480
13	13	15	8628	18.19	0.112	378.6	359.9	0.95	9.3	369.3	25.4	-0.188	10.0480
13	13	15	8629	18.18	0.112	378.5	359.9	0.95	9.3	369.2	25.5	-0.188	10.0480
13	13	15	8629	18.19	0.112	378.4	359.9	0.95	9.2	369.2	25.5	-0.188	10.0480
13	13	15	8629	18.18	0.112	378.3	359.9	0.95	9.2	369.1	25.5	-0.188	10.0480
13	13	16	8630	18.19	0.112	378.3	359.9	0.95	9.2	369.1	25.6	-0.188	10.0480
13	13	16	8630	18.18	0.112	378.3	359.9	0.95	9.2	369.1	25.6	-0.188	10.0480
13	13	16	8630	18.18	0.113	378.2	359.9	0.95	9.2	369.1	25.7	-0.188	10.0480
13	13	17	8630	18.18	0.113	377.9	359.4	0.95	9.3	368.7	25.6	-0.188	10.0480
13	13	17	8631	18.19	0.113	378.6	359.9	0.95	9.4	369.3	25.7	-0.188	10.0480
13	13	17	8631	18.19	0.113	378.5	359.9	0.95	9.3	369.2	25.8	-0.188	10.0481
13	13	17	8631	18.19	0.113	378.5	359.6	0.95	9.4	369.1	25.6	-0.188	10.0481
13	13	18	8632	18.19	0.113	378.5	359.9	0.95	9.3	369.2	25.9	-0.188	10.0481
13	13	18	8632	18.19	0.114	378.4	359.9	0.95	9.2	369.1	25.9	-0.188	10.0481
13	13	18	8632	18.19	0.114	378.4	359.9	0.95	9.2	369.1	26.0	-0.188	10.0481
13	13	18	8632	18.19	0.113	378.3	359.9	0.95	9.2	369.1	26.1	-0.188	10.0481
13	13	19	8633	18.19	0.114	378.2	359.9	0.95	9.2	369.0	26.0	-0.188	10.0481

Bild 44: Versuchsbegleitender Ausdruck für einen Versuchsstand (entsprechend für die 2 weiteren Stände)

Für die endgültige Datenspeicherung auf Diskette und Kassette werden im Versuchsablauf pro Stand 700 Meßzeilen belegt.

Die Daten werden kodiert in Zeichenfeldern mit 4 Byte pro Meßwert (damit darstellbar sind Zahlen zwischen 10^{-33} bis 10^{33}) abgelegt. Neben den Meßdaten werden die bei Versuchsbeginn eingelesenen uns im Versuchsablauf aktualisierten versuchsbegleitenden Daten und die Steuerparameter mit abgespeichert, so daß jeder Versuch auch später weitgehend reproduzierbar ist. Die Programme DIALOG und KONTROL enthalten mehrere Unterprogrammebenen. Die Unterprogramme (Bild 45) illustrieren die Leistungen der Programme.

NAME	EBENE	AUFRUFPARAMETER/RETURNPARAMETER						ERLÄUTERUNG
		p1	p2	p3	p4	p5	p6	
WAHL	I	Stand-Nr.	Prgr.phys.kennzahl	Statusvariable				Wahl des jeweiligen Standes mit Versuchsserienidentifikation
MESSEN	I	Stand-Nr.						Messen aller Geber eines Stand. mit allen Folgeberechnungen
AUSGABE	I	Stand-Nr.						Ausgabe an Datenfeld, Printer Plotter, Floppy Disk
CONSTANT	I	Stand-Nr.						Konstanthalten der aktuellen Zielgrößen (Hauptspannungen)
ZIEL	I	Stand-Nr.	Prgr.phys.kennzahl	Spg.inkr. p-q-Koord.	Sigma a	Sigma r		Berechnen neuer Zielspannungen
STUFE	I	Stand-Nr.						Einführen neuer Zielspannungen in Regelkreise
UHR	I	Datum	Uhrzeit					Lesen der Echtzeit bis Sek.
SÄTTSTUFE	I	Stand-Nr.						Sättigungsstufe aufregeln
SKETEST	I	Stand-Nr.						Sättigungstest nach Skulpton
RECORD	II							Kernspeicherinhalt auf Diskette alle 5 min, Netzausfallsicherung
GRENZ	II	Stand-Nr.	Geber-Nr.	Statusvariable				Prüfen von Gebern auf unzulässig hohe oder niedrige Werte
CODE	II	Stand-Nr.	Speicherzeile					Kodieren und Speichern einer Messzeile im Datenstring
ROLL	II	Stand-Nr.						Umsortieren der Zeilen in der Rollmatrix
ROLL-O	II	Stand-Nr.						Nullbelegung der Rollmatrix nach z.B. Laststufenaufregelung
COMMENT	II	Stand-Nr.	Komment. nummer					Ausdrucken eines vorgehaltenen Kommentars im Vers.ablauf
REGEL	II	Stand-Nr.	Bezugsgeber-Nr.	Motor Nr.	Zielwert	Nullwert	Eichwert	Anregeln eines Zielwertes mit laufender Kontrollmessung
PLOT	III	Stand-Nr.						Plot von Total- und Effektivspannungsspur, Arbeitslinie
PRINT	III	Stand-Nr.						Ausdruck einer Messzeile
ZEIT	III							Berechnung von Relativzeit
GEBER	III	Stand-Nr.	Geber-Nr.	Anzahl Messung.	Nullwert	Eichwert		Lesen eines Messwertes (p2-mal) mit Mittelung und Umrechnung
MOTOR	III	Stand-Nr.	Motor-Nr.	Impulsrate				Organisation des Motorbetriebes Relaischaltung, Pulsaufwurf
RELAIS	IV	Relais-Kart.-Nr.	Relais-Nr.	Relais-Nr.	Relais-Nr.	Relais-Nr.	Relais-Nr.	Aufschalten von Relais für In- oder Outout
PULS	IV	Anzahl Impulse						Generieren von Impulsen
DIGVO	IV							Messbereichsvorwahl am Voltmeter (je nach Geber)
TEMP	III							Lesen des Temperaturgebers

Bild 45: Unterprogramme von DIALOG und KONTROL

6.2.4 PROBENVORBEREITUNG UND EINBAU

Die zylindrischen Probenkörper wurden mit der in DIN 18137, Teil 2 (Entwurf) beschriebenen Methode aus dem inneren Bereich der Bohrkerne herausgearbeitet. Ein Ausstechen der Proben war bei keinem der untersuchten Tone möglich.

6.2.5 KONSOLIDATION UND SÄTTIGUNG

Nach anfänglichen Problemen mit Quellvorgängen bei der Sättigung der Proben wurde bei allen Versuchen der unter Punkt 6.2.3 beschriebene Ablauf eingehalten. Eine Quellttendenz löstestets eine Erhöhung des isotropen Spannungszustandes aus, so daß bei quellfähigen Tönen ein p-Wert erhalten wurde, bei dem kein Quellen mehr auftrat. Dieser Spannungszustand kann als mittlerer Quelldruck interpretiert werden.

Gesättigt wurden die Proben erst nach Erreichen dieses isotropen Spannungszustandes, bei den nicht quellfähigen Tönen bei einem allseitigen Druck von 100 kPa. Der Sättigungsdruck wurde in allen Fällen in Stufen von 50 kPa, die im Abstand von 4 bis 5 Std. in kleinen Einzelschritten aufgeregelt wurden, erhöht, so daß der Sättigungsvorgang 2 bis 3 Tage in Anspruch nahm. Auch während dieser Versuchsphase wurde auf weitere Quellttendenzen noch in der beschriebenen Weise reagiert. Auf die Messung der Volumendehnung vor Abschluß der Sättigung wurde verzichtet, da eine dafür erforderliche hinreichende Anfangssättigung des Systems (insbesondere der Zwickel zwischen den verbreiterten Endplatten und der Probe) nicht möglich war, über den Sättigungsvorgang dann jedoch immer gelang. Die Sättigung konnte mit dem üblichen Test in Anlehnung an SKEMPTON (1954) automatisch geprüft werden.

Vom Sättigungspunkt aus wurde dann die Konsolidationslinie über einen reinen Scherpfad (Bild 42) angesteuert. Konsolidiert wurde in Stufen von $\sigma_a = 2 \text{ kPa}$, $\sigma_r = K \cdot \sigma_a$. Wegen der erheblichen Unsicherheiten bei der richtigen Schätzung des letzten in-situ-Eigen Spannungszustandes der Tone und aufgrund der unter Punkt 2.2.4 dargestellten Zusammenhänge wurde ein fester K-Wert für die Konsolidation gewählt und bei allen Tönen beibehalten.

Mit dem gewählten Spannungsverhältnis für die Konsolidation

von $K = \sigma'_r / \sigma'_a = 1,2$ wurde zweierlei sichergestellt:

- Die größere Hauptspannung wirkt in der Konsolidationsphase des Versuchs in der gleichen Richtung wie in-situ, so daß keine Hauptspannungsdrehung erfolgt und damit eventuell verbundene signifikante Gefügeänderungen unterbleiben.
- Die deviatorische Beanspruchung in der Konsolidationsphase ist noch so gering, daß keine Gefügeänderungen durch Vorscheren auftreten.

Nach Erreichen des Zielspannungspunktes (Bild 42) auf der K-Linie wurde vor Beginn des Abschervorganges noch mindestens 24 Std. abgewartet.

6.2.6 ABSCHEREN UND AUSBAU

Nach abgeschlossener Konsolidation wurden die Proben über die drei Beanspruchungspfade

- Belastungskompression BK
- Entlastungskompression EK
- Entlastungsextension EE

unter undrainierten Bedingungen (volumenkonstant) abgeschert. Der Beanspruchungspfad Belastungsextension ließ sich wegen der Zelldruckbegrenzung auf ca. 1100 kPa nicht realisieren.

Im Bruchbereich kann bei der Konstanthaltung oder der Erhöhung der Hauptspannungen kein Regelerfolg mehr erzielt werden. Das Programm schaltete dann auf eine Regelung mit gleichen Impulsraten pro Zeiteinheit um.

Auf eine Erfassung von Gleitfestigkeiten mußte aus geräte-technischen Gründen verzichtet werden, Gleitfestigkeiten können ohnehin wegen der erforderlichen großen Dehnungen im Triaxialversuch nur in Ausnahmefällen oder bei besonderen Maßnahmen (Vorschneiden) bestimmt werden.

Die Versuche wurden bei Dehnungen beendet, die eine Beurteilung des Bruchbildes noch zuließen.

6.3 VERSUCHSERGEBNISSE

6.3.1 EINBAUWERTE UND QUELLVERHALTEN

Die Einbauwerte der untersuchten Tone (Bild 46) unterscheiden sich von denen der bereits beschriebenen Klassifikations-

und Ödometerversuche nur geringfügig im Rahmen der zwischen Einzelproben beobachteten Streuung.

	Wassergehalt(%)			Porenzahl(-)			Sätt.zahl(-)		
	von	bis	$\bar{w}$	von	bis	$\bar{e}$	von	bis	$\bar{S}_r$
ME	19,0	23,0	21,0	0,53	0,59	0,57	0,97	1,00	0,99
WO	30,5	32,8	31,0	0,82	0,86	0,83	1,00	1,00	1,00
HH	14,7	15,5	15,0	0,40	0,42	0,41	0,97	1,00	0,99
KI	19,2	20,5	19,0	0,51	0,54	0,53	0,99	1,00	1,00
SP	22,0	24,0	23,0	0,59	0,65	0,62	0,97	1,00	0,99
ED	31,9	34,5	33,0	0,83	0,89	0,87	0,99	1,00	1,00

Bild 46: Einbauwerte der Tone

Mit dem bereits beschriebenen besonderen Ablauf bei Versuchsbeginn wurde sichergestellt, daß diese Einbauwerte zu Beginn der Konsolidation bei zusätzlicher Sättigung der Proben und des Systems nach wie vor vorhanden waren. Unter dem sofort aufgeregelten allseitigen Druck von 100 kPa traten nur minimale Konsolidationseffekte, feststellbar durch Axialdehnungsmessungen, auf. In nahezu allen Fällen wurden vielmehr Quell Tendenzen beobachtet, denen sofort gegengesteuert werden mußte.

Eine Auswertung des Verformungsverhaltens auf Pfad 2 (reine Schubbeanspruchung, $p' = \text{konstant}$) war nicht möglich, da die deviatorische Beanspruchung der Proben von $\Delta q = 7$ bis 15 kPa bei den steifen bis halbfesten Tönen nur zu sehr geringen Verformungen führte. Die für die Berechnung von Radialdehnungen notwendigen Volumenänderungen lagen teilweise im Bereich der Genauigkeit des Messsystems, so daß Schubmoduli nicht ermittelt werden konnten.

Die zur Unterdrückung der Quellneigung notwendigen, durch automatische Aufreglung erhaltenen p -Werte, die dem Quelldruck der Tone in axialer (vertikaler) Richtung bei Dehnungen bis max. 0,3 % entsprechen, sind teilweise sehr hoch (Bild 47). Sie liegen deutlich höher als die im Ödometer ermittelten Beträge (Bild 34), was auf das im Gegensatz zu

den Ödometerversuchen hier bessere Wasserangebot (Sättigungsdruck, Zufluß über Probenumfang, etc.) zurückgeführt werden kann. Im Ödometerversuch wird u.U. der innere Bereich der Probe in den Quellvorgang nicht voll einbezogen.

	n	P_Q	s
WO	9	200	40
ME	12	300	42
SP	12	140	34

n: Versuchsanzahl s: Standardabweichung
 P_Q : Quelldruck (kPa)

Bild 47: Quelldrücke der Tone im Triaxialversuch (Tone HH KI und ED: Quelldrücke < 100 kPa oder nicht vorhanden)

Die Quelldrücke bilden eine untere Grenze für die maximale Vertikalbelastung der Tone. Schätzungen der Auflast können jedoch über Quelldrücke nicht vorgenommen werden, da das Auftreten solcher Entspannungsquellvorgänge nicht nur von der Vorbelastung, sondern auch von einem geeigneten Mineralbestand abhängen.

6.3.2 KONSOLIDATIONSVERHALTEN

Die Dehnungsgeschwindigkeiten in der Konsolidationsphase wurden durch die Kriterien

$$\Delta u(\Delta \sigma) = 0$$

$$\Delta V(\Delta \sigma) = \text{konstant}$$

bestimmt. Die Steuerung führte bei dem vergleichsweise weichen Lauenburger Ton zu Dehnungsgeschwindigkeiten von ca. $\dot{\epsilon}_a = 0,6 \cdot 10^{-3} (\%/min)$, bei dem sehr viel dichteren Rupel-Ton zu Werten um $0,2 \cdot 10^{-3} (\%/min)$, der quellfähige Unterkreide-Ton ME erreichte Werte von nur $0,05 \cdot 10^{-3} (\%/min)$. Die beiden sehr steifen Miozän-Tone zeigten Porenwasserdruckschwankungen in der Größenordnung des für die Regelung benötigten Grenzwertes, so daß die dort beobachteten Dehnungsgeschwindigkeiten

von $0,4 \cdot 10^{-3} (\%/min)$ vermutlich größer hätten sein können. Gleiches gilt auch für die Belastungsgeschwindigkeiten. Charakteristisch für das Spannungs-Verformungs-Verhalten aller Tone in der Konsolidationsphase ist ein eindeutig linearer Zusammenhang zwischen der - zunehmenden - Hauptspannungssumme p' und der Volumen- und Axialdehnung (Bild 48). Der Miozän-Ton KI zeigt ein etwas abweichendes Verhalten mit einer ab 250 kPa schwach abnehmenden Volumendehnung. Die radiale Zusammendrückbarkeit dieses Tones wurde demnach ab Radialspannungen von ca. 250 kPa geringer.

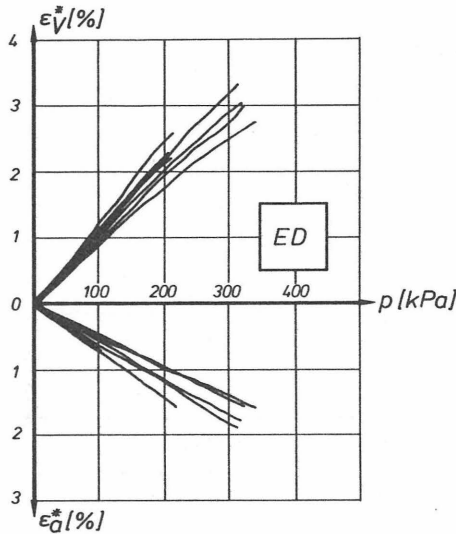


Bild 48: Axialdehnung ϵ_a^* und Volumendehnung ϵ_V^* während der Konsolidationsphase, Beispiel Lauenburger Ton

Da in der Konsolidation keine isotrope, sondern mit $K = 1,2$ eine schwach anisotrope Beanspruchung vorlag, kann ein Kompressionsmodul nicht angegeben werden. Zum Vergleich der Tone werden 2 Verformungsmoduli definiert:

$$M_1 = \frac{\Delta p'}{\epsilon_a} \quad (\text{MPa}) \quad M_2 = \frac{\Delta p'}{\epsilon_V} \quad (\text{MPa})$$

Die Moduli wurden jeweils aus den Meßwerten des gesamten Konsolidationsbereiches bestimmt.

Da für alle Einzelversuche stets gleiche Versuchsrandbedingungen eingehalten wurden, können die Moduli aller Teilversuche gemittelt werden (Bild 49).

Beide Moduli korrespondieren gleichsinnig miteinander. Die Miozän-Tone zeigen auch hier die mit Abstand höchste Steifigkeit, gefolgt von den Kreide-Tonen. Am Schluß rangiert der Lauenburger Ton vor dem Rupel-Ton.

Da die Volumen- und Axialdehnung gemessen wurden, kann die Radialdehnung der Proben berechnet und gegebenenfalls anisotropes Verhalten erkannt werden.

Homogene isotrope Stoffe verformen sich bei isotroper Beanspruchung mit

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$$

Bei zylindrischer Beanspruchung gilt entsprechend:

$$\epsilon_r = \epsilon_a ; \epsilon_v = 3\epsilon_a = 3\epsilon_r$$

Für homogene, isotrope Stoffe gilt deshalb:

$$\epsilon_v / \epsilon_a = 3$$

Über $\epsilon_r = (\epsilon_v - \epsilon_a) / 2$ können Verhältnismerte ϵ_r / ϵ_a errechnet werden (Bild 49).

	M_1 (MPa)	M_2 (MPa)	M_1 / M_2^{**}	ϵ_r / ϵ_a
ME	28,000	15,140	1,85	0,43
WO	29,000	13,800	2,10	0,55
SP	13,100	9,000	1,45	0,23
HH	58,000	27,700	2,09	0,54
KI*	66,000	18,400	3,59	1,30
ED	19,000	10,200	1,86	0,43

*: im Bereich $p=0$ bis $p=250$ kPa bestimmt

** : M_1 / M_2 entspricht ϵ_v / ϵ_a

Bild 49: Moduli M_1 und M_2 und Folgewerte

Bei allen untersuchten Tonen und Einzelproben sind die Quotienten ϵ_v / ϵ_a deutlich von 3 verschieden (Bild 49).

Die Tone verhalten sich damit durchweg signifikant anisotrop. Die errechneten Werte ϵ_r/ϵ_a unterstreichen diese Beobachtung (Bild 49).

Die Tone sind mit Ausnahme des Miozän-Tones KI in horizontaler Richtung (ϵ_r) weit weniger zusammendrückbar als in vertikaler Richtung (ϵ_a). Der Miozän-Ton KI zeigt ein entgegengesetztes Verhalten, er ist in horizontaler Richtung stärker als in vertikaler Richtung zusammendrückbar. Dieses Verhalten ändert sich, wenn der mittlere Druck p 250 kPa übersteigt. Die Ausnahmestellung des Tones KI wurde bereits bei den Ödometerversuchen beobachtet und tritt auch hier auf. Die unter Punkt 5 gegebene Erklärung ist auch hier zutreffend.

Die vertikale Zusammendrückbarkeit ist bei den Tönen im untersuchten Spannungsbereich zwischen 1,2 (HH) und 4 (SP) mal größer als in horizontaler Richtung.

ATKINSON (1975) untersuchte ungestörten eozänen "London Clay" unter isotroper Konsolidation bis zu mittleren Drücken p'_c von 480 kPa und stellte lineare Zusammenhänge zwischen Axialdehnung, Volumendehnung und mittlerem Druck fest. ATKINSON gibt Verhältnisse $d\epsilon_v/d\epsilon_a$ von 1,27 (für vertikale Proben) bis 3,82 (für horizontale Proben) an und folgert daraus eine hohe Anisotropie im elastischen Verhalten.

GRAHAM & HOULSBY (1983) untersuchten "Winnipeg Clay" (steifer, hoch plastischer Ton mit ausgeprägter Textur) und berichten ebenfalls über anisotrope Verformungen bei isotropem Spannungszuwachs p und geben Verhältnisse $d\epsilon_v/d\epsilon_a$ von 1,52 bis 2,33 an.

STARZEWSKI & THOMAS (1977) berichten über Versuche an hoch überkonsolidiertem "Lias Clay" mit gleichfalls linearem Verhalten und geben Werte ϵ_v/ϵ_a von 0,66 bis 1,2 an. Die von den erwähnten Autoren für die betreffenden Spannungsbereiche beobachtete Linearität der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen und die hohe Anisotropie, die sich in einer deutlichen Abweichung der ϵ_v/ϵ_a -Werte vom Wert 3 (für isotropes Verhalten) äußert, wird bei allen hier untersuchten Tönen ebenfalls beobachtet.

Die festgestellte höhere Zusammendrückbarkeit in vertikaler Richtung ist möglicherweise noch etwas größer, da mit einem

K-Wert von 1,2 die vertikale Spannung σ_a um 20% geringer als die horizontale Spannung σ_r eingestellt war. Die Untersuchungen zum Gefüge werden zeigen, ob die beobachtete mechanische Anisotropie auf eine gestaltliche Anisotropie zurückgeführt werden kann. Die Moduli M_1 und M_2 hängen als Verformungsparameter von der Porenzahl e ab, die Zusammenhänge lassen sich wie auch schon der Zusammenhang $E_s = f(e)$ funktional beschreiben (Bild 50).

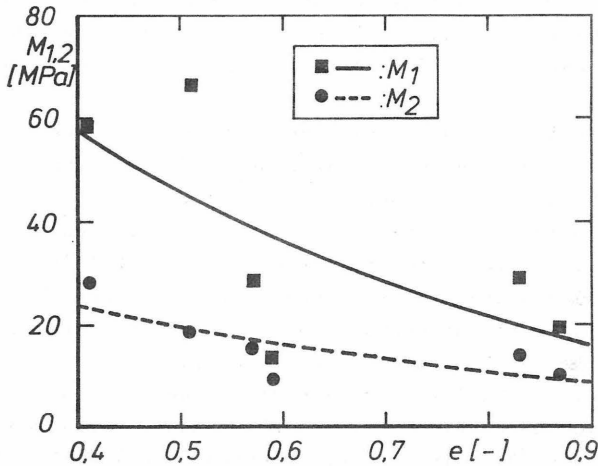


Bild 50: Abhängigkeit der Verformungsmoduli M_1 und M_2 von der Porenzahl e

6.3.3 VERHALTEN BEI SCHERBELASTUNG

Die Proben wurden nach Abschluß der Konsolidation unter Volumenkonstanz (undrainiert) auf 3 Pfaden abgeschert. Als Bruchzustand wurde zunächst der Spannungszustand bezeichnet, bei dem ein Extremwert der deviatorischen Belastung q auftrat. Da bei überverdichteten Böden, wie unter 2.2.4 erläutert, nur bei inhomogener Verzerrung ein ausgeprägter Extremwert q_{extr} auftreten kann und bei den meisten Versuchen auch nicht beobachtet werden konnte, wurde das Kriterium r'_{extr} verwendet (Kompression: $r'_{max} = (\sigma'_a / \sigma'_r)_{max}$; Extension: $r'_{min} = (\sigma'_a / \sigma'_r)_{min}$). Bei normal- und leicht überver-

dichteten Böden liegen die beiden Bruchkriterien meist in einem Spannungspunkt. Mit zunehmender Überverdichtung tritt das Kriterium r'_{extr} vor q_{extr} auf, beide Kriterien liegen dann jedoch auf der Bruchgeraden.

Nach Ausbau der Proben wurde die Art der Bruchverformung aufgenommen und beurteilt (Ausnahme: KI, teilweise W0, dort wurden sehr große axiale Dehnungen zugelassen).

In nahezu allen Fällen konnten eindeutige Bruchflächen beobachtet werden (Bild 51). Trotz Parallelführung des Belastungsstempels, Endflächenschmierung und vergleichsweise geringer Probenhöhe (7 cm) traten also inhomogene Verzerrungen auf, eine typische Verhaltensweise überkonsolidierter Tone. Die Bruchwinkel von Kompressionsversuchen waren meist größer als die der Extensionsversuche. Insgesamt wurden Bruchwinkel θ zwischen $\sim 40^\circ$ und $\sim 70^\circ$ gemessen, ohne daß für Tone oder Belastungspfade typische Werte angegeben werden können. Die Lage der Bruchflächen wird, da ein Einfluß des Reibungswinkels ϕ , wie er nach MOHR-COULOMB mit $\theta = 45^\circ + \phi'/2$ erwartet werden kann, nicht festzustellen ist, im wesentlichen vom Gefüge der Tone und lokalen Inhomogenitäten bestimmt.

Die Belastungsgeschwindigkeiten $\dot{\sigma}_1$ in der undrainierten Scherphase wurden durch das Kriterium $\Delta u(\Delta \sigma) = \text{konstant}$ bestimmt. Konstanz wurde festgestellt, wenn sich der Porenwasserdruck in 10 bis 14 min um nicht mehr als 0,5 kPa änderte. Es ergaben sich Belastungsgeschwindigkeiten von

$$3 < \dot{\sigma}_1 \text{ (kPa/min)} < 10$$

und zugehörige Dehnungsgeschwindigkeiten von

$$0,2 \cdot 10^{-3} < \dot{\epsilon}_a \text{ (\% /min)} < 0,5 \cdot 10^{-3}$$

wobei sich bei den Miozän-Tonen als vergleichsweise durchlässigeren Tonen aufgrund der dort auftretenden Streuung in der Porenwasserdruckmessung (etwa 1 bis 2 kPa) keineswegs immer schnellere Belastungsgeschwindigkeiten einstellten.

Die Belastungsgeschwindigkeiten lagen aufgrund des relativ strengen Kriteriums auf der sicheren Seite, was auch durch die in fast allen Fällen beobachtete Deckung der Effektivspannungspfade bei Be- und Entlastung bestätigt wird.

Bild 51: Bruchbilder der untersuchten Tone (ohne Ton KI)

	BK-VERSUCH (BELASTUNG-KOMPRESSION)	EK-VERSUCH (ENTLASTUNG-KOMPRESSION)	EE-VERSUCH (ENTLASTUNG-EXTENSION)
ME	ME 83102 ME 83202 ME 83302 ME 83402     $\beta=45^\circ$ $\beta=35^\circ$ — $\beta=40^\circ$	ME 83103 ME 83203 ME 83303 ME 83403     $\beta=45^\circ$ $\beta=45^\circ$ $\beta=45^\circ$ $\beta=45^\circ$	ME 83101 ME 83201 ME 83301 ME 83401     — $\beta=40^\circ$ — —
WO	WO 82201 SERIE 82101, 82301 nicht aufgenommen!    $\beta=40^\circ$	WO 82202 SERIE 82102, 82302 nicht aufgenommen!    $\beta=40^\circ$	WO 82203 SERIE 82103, 82303 nicht aufgenommen!    $\beta=40^\circ$
SP	SP 83102 SP 83202 SP 83302 SP 83402     $\beta=40^\circ$ $\beta=55^\circ$ $\beta=60^\circ$ $\beta=70^\circ$	SP 83103 SP 83203 SP 83303 SP 83403     $\beta=65^\circ$ $\beta=50^\circ$ $\beta=50^\circ$ —	SP 83101 SP 83201 SP 83301 SP 83401     $\beta=30^\circ$ — $\beta=20^\circ$ $\beta=35^\circ$
HH	HH 82101 HH 82201 HH 82301    $\beta=50^\circ$ $\beta=55^\circ$ $\beta=60^\circ$	HH 82102 HH 82202 HH 82302    $\beta=70^\circ$ $\beta=60^\circ$ $\beta=65^\circ$	HH 82103 HH 82203 HH 82303    $\beta=40^\circ$ — $\beta=40^\circ$
ED	ED 82102 ED 82202 ED 82302 ED 82402 ED 82502      $\beta=65^\circ$ $\beta=60^\circ$ $\beta=55^\circ$ $\beta=60^\circ$ $\beta=65^\circ$	ED 82103 ED 82203 ED 82303 ED 82403 ED 82503      — $\beta=55^\circ$ $\beta=45^\circ$ $\beta=60^\circ$ —	ED 82101 ED 82201 ED 82301 ED 82401 ED 82501      $\beta=30^\circ$ $\beta=50^\circ$ — — $\beta=60^\circ$

6.3.3.1 SPANNUNGSPFADE

Der Verlauf der Totalspannungspfade wurde in Bild 42 beschrieben. Die Effektivspannungspfade der untersuchten Tone unterscheiden sich teilweise erheblich (Bilder 52 und 53). Die Miozän-Tone HH und KI zeigen bei Belastungskompression einen für hoch überkonsolidierte Tone typischen Verlauf, der durch eine asymptotische Annäherung der Pfade an die Bruchgerade gekennzeichnet ist, ohne daß ein eindeutiger Bruchpunkt erreicht wird. Bei Entlastungskompression wird hingegen meist ein Bruchpunkt q_{extr} erreicht. Bei Extension zeigt der Ton HH nahezu zur K-Linie spiegelbildliche Pfade, während die Pfade des Tones KI später zur Bruchlinie hin einschwenken. Eine Änderung der Pfadcharakteristik mit zunehmendem p'_c -Wert, die auf einen naheliegenden Vorspannungszustand hindeuten würde, ist kaum erkennbar.

Die beiden Kreide-Tone ME und WO zeigen jeder für sich bei Kompression und Extension weitgehend ähnlich verlaufende Effektivspannungspfade. Bei dem Ton ME tritt nach anfangs nahezu linear verlaufenden Pfaden eine bei allen Belastungspfaden ausgeprägte weiche Krümmung zur Bruchlinie hin auf, r'_{extr} wird wie bei den Miozän-Tönen stets vor q_{extr} erreicht. Der Ton WO zeigt ein ähnliches Verhalten mit einer insgesamt deutlich höheren Streuung. Bei beiden Tönen kann keine Änderung der Pfadcharakteristik mit steigendem p'_c beobachtet werden (vergl. dazu mit Bild 14).

Der Lauenburger Ton ED besitzt Spannungspfade, die für schwach überkonsolidierte Tone typisch sind. Der Bereich der Bruchgeraden wird über fast lineare oder nur schwach gekrümmte Pfade erreicht. Die Bruchpunkte sind ausgeprägt, die beiden Bruchkriterien treten in einem Spannungspunkt auf. Mit zunehmendem p'_c -Wert werden die mittleren Neigungen der Pfade zur q -Achse hin, besonders bei Extension, geringer. Der Rupel-Ton SP zeigt Effektivspannungspfade, die denen der Kreide-Tone ähneln. Im Unterschied zu diesen schwingen die Pfade jedoch zu Beginn der Belastung deutlich zur q -Achse hin aus und nähern sich dann erst asymptotisch der Bruchgeraden.

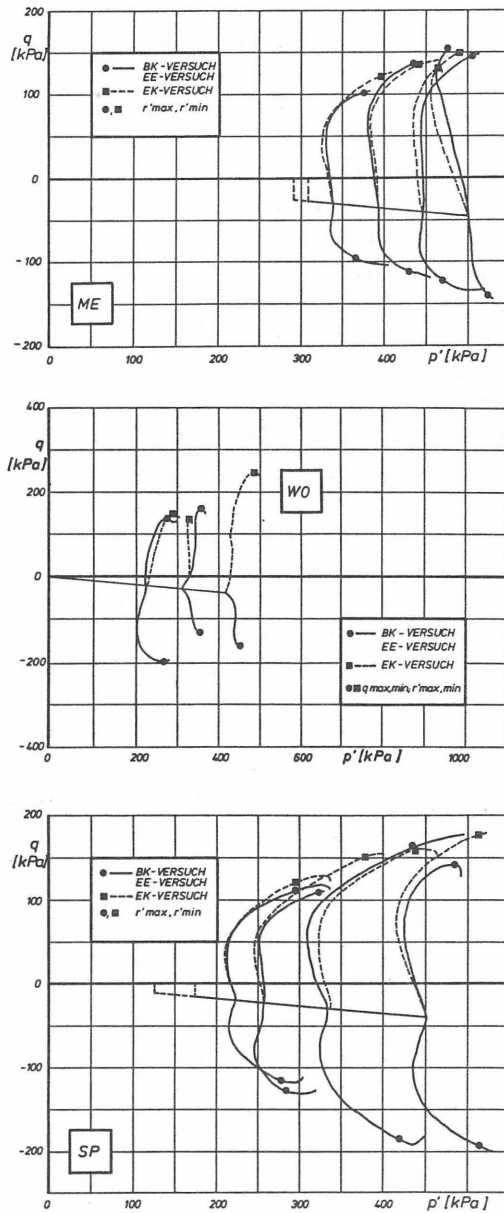


Bild 52: Effektivspannungspfade der Tone ME, WO und SP

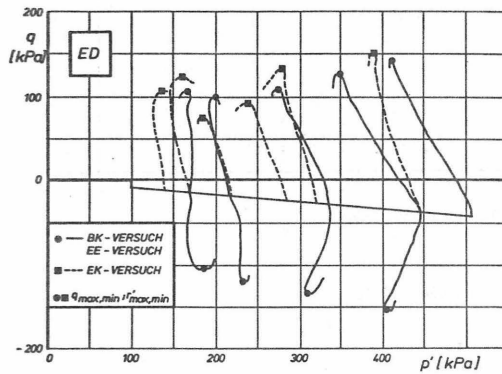
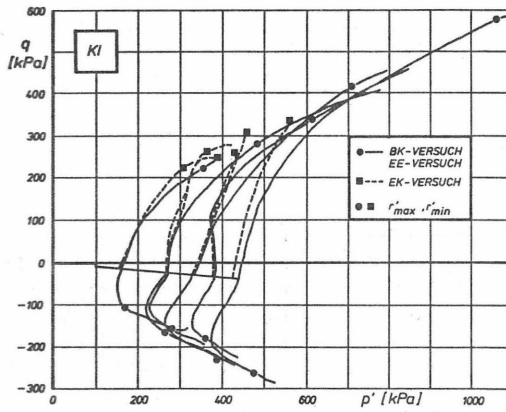
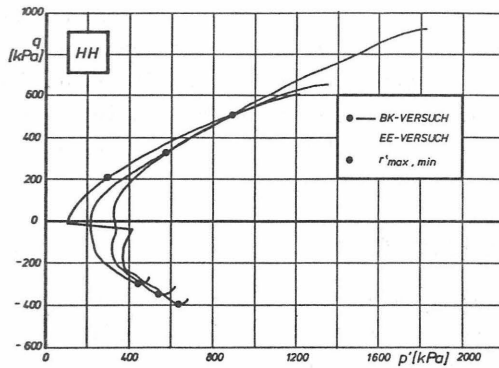


Bild 53: Effektivspannungspfade der Tone HH, KI und ED

Mit Ausnahme des quartären Lauenburger Tones ED zeigen alle untersuchten Tone, zumindest bei Annäherung an die Bruchgerade, einen Abbau von Porenwasserüberdruck, der auf dilatantes Verhalten bei drainierter Belastung hindeutet. Diese Beobachtung wird bei der Untersuchung des Porenwasserdruckverhaltens genauer betrachtet.

6.3.3.2 ARBEITSLINIEN

Die Arbeitslinien $q = f(\epsilon_a^*)$ der Tone unterscheiden sich charakteristisch (Bild 55). Die Bruchdehnungen sind nur beim Lauenburger Ton ED eindeutig aus den Arbeitslinien zu entnehmen. Abgesehen von den Tönen SP und HH werden jedoch bereits bei geringen axialen Dehnungen die Bruchzustände erreicht (Bild 54).

Die Extremwerte der Arbeitslinien $r' = f(\epsilon_a^*)$ werden meist deutlich vor den q_{extr} -Werten erreicht (Bild 54, Bild 56), bei Extension teilweise bei Dehnungen unter 1%.

	BK		EK		EE	
	q_{extr}	r'_{extr}	q_{extr}	r'_{extr}	q_{extr}	r'_{extr}
KI	2-3	1-2	1-2	1-2	1-4	0.6-1
HH	4-8	1-3	1-2	1-4	2-4	0.5-1
ME	4-5	2-5	4-5	2-5	1-3	0.2-1
WO	1-3	2-3	1-4	2-5	1-2	0.5-1
SP	8	4-6	8	4-6	5-6	2-3
ED	2-3	1-3	1-3	1-2	2-3	1-2

Bild 54: Bruchdehnungen ϵ_a^* (%)

6.3.3.3 VERFORMUNGSMODULI

Die Pfadabhängigkeit des Verformungsverhaltens der Tone wird für kleine und mittlere Spannungsänderungen untersucht. Dazu werden aus axialer Dehnung und Spannungsänderung Sekantenmoduli bestimmt und verglichen.

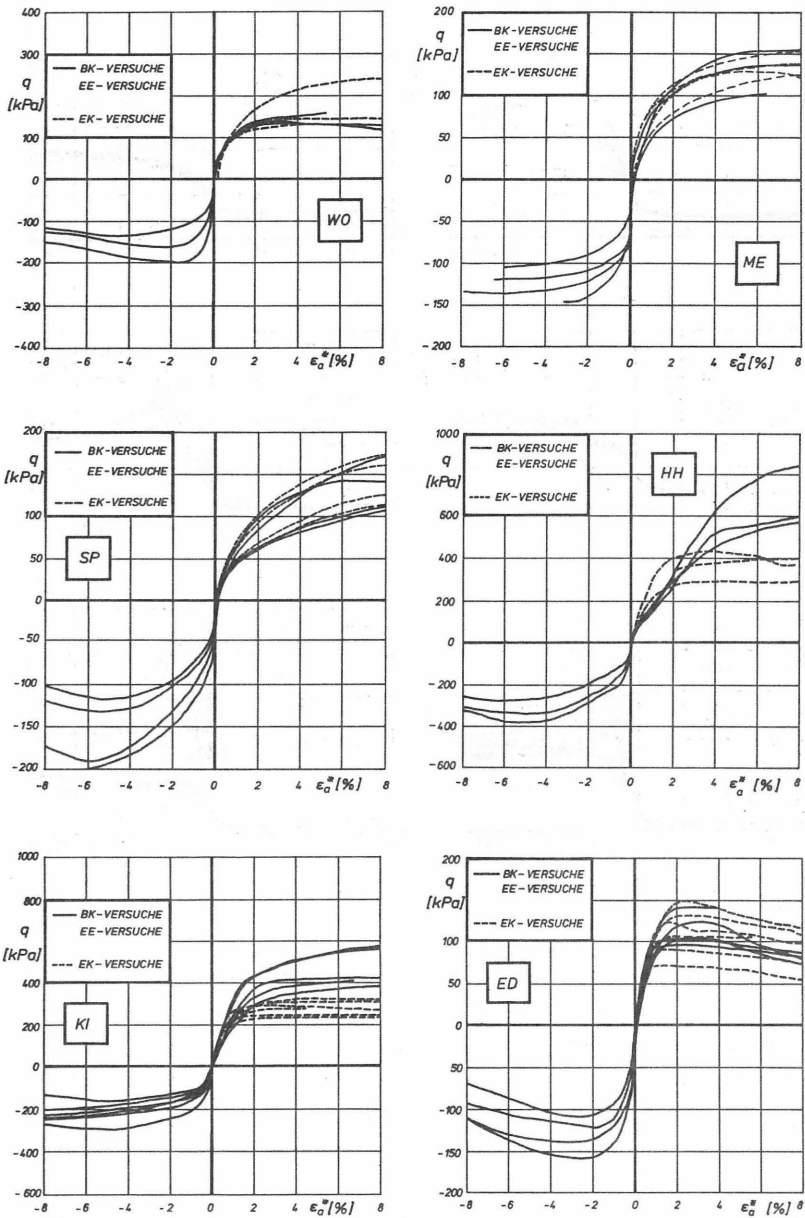


Bild 55: Arbeitslinien $q = f(\epsilon_a^*)$

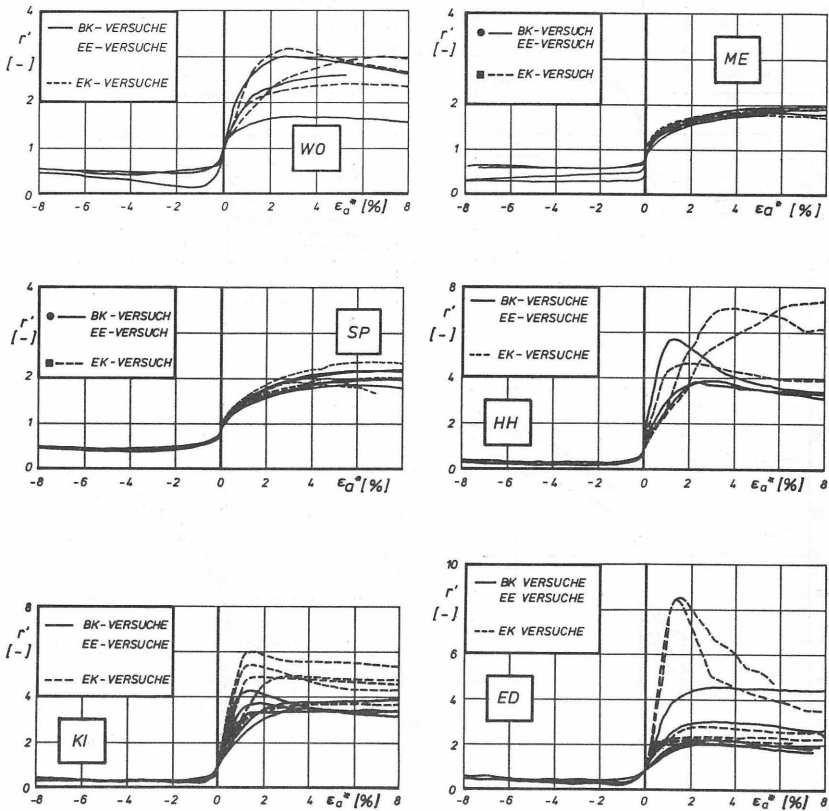


Bild 56: Arbeitslinien $r' = f(\epsilon_a^*)$

Aus der Steifigkeitsmatrix für elastisch-isotropes Verhalten läßt sich für die im Triaxialversuch gegebene rotations-symmetrische Belastung ableiten:

$$\Delta \epsilon_a = \frac{\Delta \sigma_a}{E} - \frac{2 \cdot \nu}{E} \cdot \Delta \sigma_r$$

Wegen der hier durchgeführten undrainierten Belastung (Volumenkonstanz) mit $\nu = 0,5$ kann ein Verformungsmodul E_d für verschiedene Belastungspfade aus axialer Dehnung und der

Spannungsänderung einfach berechnet werden:

Belastungskompression

$$\Delta\sigma_a > 0 ; \quad \Delta\sigma_r = 0 \quad \rightarrow \quad E_d = \frac{\Delta\sigma_a}{\Delta\epsilon_a}$$

Entlastungskompression

$$\Delta\sigma_a = 0 ; \quad \Delta\sigma_r < 0 \quad \rightarrow \quad E_d = \frac{\Delta\sigma_r}{\Delta\epsilon_a}$$

Entlastungsextension

$$\Delta\sigma_a < 0 ; \quad \Delta\sigma_r = 0 \quad \rightarrow \quad E_d = \frac{\Delta\sigma_a}{\Delta\epsilon_a}$$

Da bei der Scherbeanspruchung stets nur eine Hauptspannung verändert wurde, die Spannungsänderungen $\Delta\sigma_a$ bzw. $\Delta\sigma_r$ also mit $2\Delta q$ jeweils betragsmäßig übereinstimmen, können die erhaltenen Moduli miteinander verglichen werden.

Verwendet werden für diesen Vergleich die Sekantenmoduli E_{da1} und E_{da2} (Bild 57)

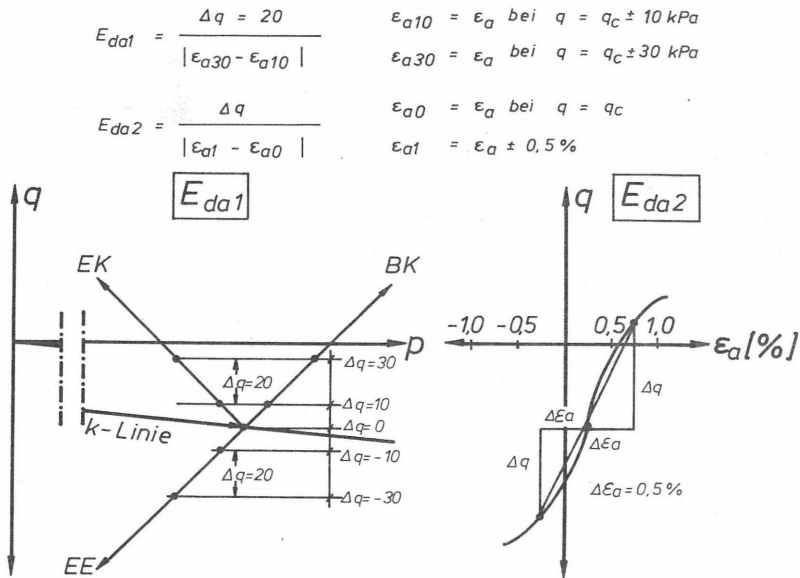


Bild 57: Deviatorbeträge für die Bestimmung der Sekantenmoduli E_{da1} und E_{da2}

Bei elastisch-isotropem Material sind die Moduli unabhängig vom Belastungspfad. Unterschiedliche Moduli können anisotropes Verhalten und unterschiedliche Abstände des jeweiligen Ausgangszustandes vom Grenzzustand als Ursache haben.

Unterschiedliche Moduli bei Be- und Entlastung können hingegen nicht auf anisotropes Verhalten, das auch eine Eigenschaft elastischer Stoffe sein kann, zurückgeführt werden. Be- und Entlastungsversuche unterscheiden sich nur durch die im einen Falle zunehmende, im anderen Falle abnehmende Hauptspannungssumme p (Bild 15), die deviatorische Belastung q bleibt nach Betrag und Richtung gleich. Unterschiedliche Moduli können deshalb nur auf plastische Formänderungen zurückgeführt werden, die mit der Zunahme oder Abnahme von p verbunden sind. Es kann angenommen werden, daß bei einer Reduktion des Spannungsniveaus (EK) die in den überkonsolidierten Tönen vorhandenen Bindungskräfte einen stärkeren Einfluß ausüben als bei Erhöhung des Spannungsniveaus (BK), so daß es bei Entlastung zu größeren gemessenen Steifigkeiten kommen kann. Ein Anisotropiemaß, das den Einfluß des Spannungspfades beinhaltet, kann mit folgendem Verhältniswert angegeben werden:

$$\alpha_{a1} = E_{dal}(EK) / E_{dal}(EE)$$

$$\alpha_{a2} = E_{da2}(EK) / E_{da2}(EE)$$

Untersucht werden die Töne KI, ME, ED und SP. Die Töne WO und HH entfallen wegen der geringen Versuchsanzahl, die bei der Auswertung der Anfangsdehnungsbereiche noch stärkeren Einfluß nimmt als bei der Betrachtung von Grenzzuständen.

Zunächst wird der Zusammenhang $E_d = f(p_c)$ betrachtet. Trotz der für die ungestörten Proben normalen hohen Wertestreueung werden Ausgleichskurven berechnet, um Tendenzen erkennen zu können (Bild 58). Die Ausgleichskurven können nur für den jeweils betrachteten Spannungsbereich gelten und stellen keine abgesicherte statistische Auswertung dar.

Bei fast allen Tönen und Spannungspfaden ist eine deutliche Abhängigkeit $E_d = f(p_c)$ zu erkennen, die Steifigkeit wird also durchweg vom Konsolidationszustand bzw. Ausgangsspannungsniveau beeinflusst.

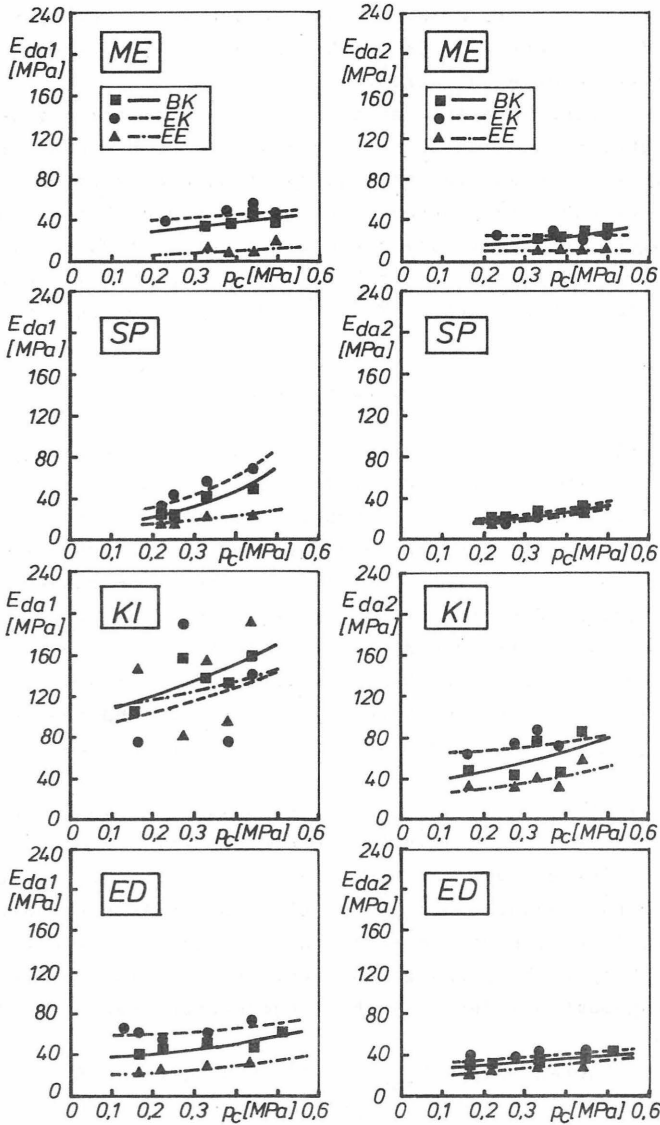


Bild 58: Sekantenmoduli bei verschiedenen Spannungspfaden als Funktion des mittleren Konsolidationsdruckes

Der Kreide-Ton zeigt bei Entlastungsextension und dem Sekantenmodul E_{da2} (0,5% Dehnung) keine Zunahme der Steifigkeit mit dem mittleren Konsolidationsdruck, da bei diesem Ton und Belastungsfall EE bei Dehnungen um 0,5% bereits der Bruchbereich erreicht wurde.

In allen anderen Fällen ist ein signifikanter Anstieg der Steifigkeiten mit dem p_c -Wert zu beobachten. Der Grad der Abhängigkeit, also die Steigung der Ausgleichskurven, ist wegen der hohen Wertestreuung und der geringen Versuchszahl nicht gesichert auszuwerten. Eindeutig anzugeben ist jedoch die Abhängigkeit der Verformungsparameter von der Belastungsart. Für 3 Tone (ME, SP, ED) gilt der Zusammenhang:

$$E_d(EK) > E_d(BK) > E_d(EE)$$

Der Miozän-Ton KI zeigt diese Relation nur bei dem E_{da2} -Wert. Ursache ist neben der bei diesem Ton aufgrund seiner hohen Steifigkeit besonders hohen Streuung die bereits erwähnte bevorzugte Entspannung der Proben in horizontaler Richtung bereits in-situ. Bei größeren Beanspruchungen (E_{da2}) geht dieser Einfluß zurück und der Ton zeigt ein ähnliches Verhalten wie die anderen Tone.

Die Tone verhalten sich hier also grundsätzlich ähnlich, wobei der Ton KI gerade durch sein teilweise anderes, aber eindeutig interpretierbares Verhalten die Ergebnisse unterstreicht.

Da die Wertestreuung und die unterschiedlichen Ausgleichskurven ($y = a \cdot e^{b \cdot x}$, Bild 58) einen direkten Vergleich der Tone und Belastungsarten nicht zulassen, werden für eine Vergleichsspannung von $p_c = 350$ kPa aus den Ausgleichskurven Moduli errechnet und verglichen (Bild 59). Die gewählte Vergleichsspannung repräsentiert in etwa die Mitte der insgesamt bei den Versuchen abgedeckten Spannungsbereiche.

Die berechneten Moduli E_{dal} (Bild 59) sind für EK-Versuche zwischen 0% und 40%, die E_{da2} -Werte zwischen 10% und 30% höher als für BK-Versuche.

Die Unterschiede zwischen den Moduli für Extension (EE) und Kompression (EK) sind sehr viel größer. Sie liegen

zwischen 10% (KI) und 300% (ME). Die beobachteten Unterschiede sind bei größeren Dehnungen (E_{da2}) meist kleiner (Bild 59).

	BK		EK		EE		EK/BK		EK/EE	
	E_{da1}	E_{da2}	E_{da1}	E_{da2}	E_{da1}	E_{da2}	E_{da1}	E_{da2}	α_{a1}	α_{a2}
ME	35	23	44	26	14	11	1,3	1,1	3,1	2,4
SP	38	24	53	27	21	19	1,4	1,1	2,5	1,4
KI	140	62	142	78	131	41	1,0	1,3	1,1	1,9
ED	50	35	65	39	29	29	1,3	1,1	2,2	1,3

Bild 59: Sekantenmoduli (MPa) und Folgewerte für die Vergleichsspannung von $p = 350$ kPa

Abhängigkeiten im Verformungsverhalten von der Belastungsart wurden auch an anderen Tonen beobachtet.

YUDBIR & VARADAJAN (1975) stellten an normalkonsolidiertem Ton ein Verhältnis der Anfangstangentenmoduli von $E_i(EK)/E_i(BK) = 4$ fest. VAID & CAMPANELLA (1974) beobachteten an normalkonsolidiertem "Haney Clay" bei Extension geringere Steifigkeiten als bei Kompression. PARRY & NADARAJAH (1973) untersuchten künstlich überkonsolidierten Kaolin-Ton und stellten bei kleinen Dehnungen und isotroper Konsolidation bei Extension ebenfalls kleinere Steifigkeiten als bei Kompression fest. CAIRNCROSS & JAMES (1977) untersuchten verschiedene überkonsolidierte Tone in triaxialen und ebenen undrainierten Scherversuchen und beobachteten bei Kompression bis zu viermal höhere Steifigkeiten als bei Extension. Sie geben an, daß derart hohe Unterschiede mit elastisch-anisotropem Verhalten allein nicht mehr interpretiert werden können und führen als Ursache plastische Verformungen an.

Eine Untersuchung der Anfangstangentenmoduli mit der von KONDNER (1963) vorgeschlagenen Methode führte hier nicht zu Erfolg, da die Arbeitslinien mit dem hyperbolischen Ansatz nur in wenigen Fällen zu linearisieren waren.

Als wesentliche Ergebnisse der Untersuchung des Verformungsverhaltens bei Scherbelastung können festgehalten werden: Der Miozän-Ton KI besitzt die höchste Steifigkeit, gefolgt vom Lauenburger Ton ED, dem Rupel-Ton SP und dem Unterkreide-Ton ME. Die vergleichsweise hohe Steifigkeit des Lauenburger Tons und die niedrige Steifigkeit des Tons ME, die bei den bisher beschriebenen Untersuchungen nicht beobachtet wurden, sind auf unterschiedliche, von der Dichte unabhängige Widerstände der Tone gegen die zum Ausbilden einer Scherfuge erforderlichen Gefügeänderungen zurückzuführen.

Die Tone ME, SP und ED zeigen bei der hier gegebenen Beanspruchung unter undrainierten Bedingungen eine deutliche Anisotropie (α_{a1}), die bei weiterer Dehnung kleiner wird (α_{a2}). Der Miozän-Ton KI zeigt zunächst (α_{a1}) beinahe isotropes Verhalten und erst bei Dehnungen um 0,5% ein Verhalten wie die anderen Tone (α_{a2}). Dieses abweichende Verhalten konnte einer Ursache eindeutig zugeordnet werden.

Die Steifigkeit ist bei Entlastung bei den Tönen ME, SP und ED größer als bei Belastung, da die Tone bei Verminderung des mittleren Druckes p den erforderlichen Strukturänderungen einen vergleichsweise höheren Widerstand entgegensetzen als bei Belastung. Der Miozän-Ton KI zeigt auch hier bei Belastungsbeginn ein anderes Verhalten. Die Beobachtungen werden nach den Gefügeuntersuchungen interpretiert.

6.3.3.4 PORENWASSERDRUCKVERHALTEN

Die unter Punkt 2.2.4 erläuterte Unterteilung der Porenwasserdruckänderung in die beiden Anteile $\Delta u(\sigma_{oct})$ und $\Delta u_s = \Delta u(\tau_{oct})$ erlaubt durch Betrachtung des Anteiles Δu_s Hinweise auf dilatantes oder kontraktantes Verhalten der Tone.

Die Darstellungen von Δu_s als Funktion der axialen Dehnung ϵ_a^* (Bilder 60 und 61) zeigt zunächst bei allen Tönen und Kompressionsbelastung einen unterschiedlich starken Porenwasserdruckanstieg. Die Tone reagieren also alle auf Kompressionsbelastung mit Tendenz zu kontraktantem Verhalten bei beginnender Dehnung. Bei Extension ist in allen Fällen von Belastungsbeginn an eine Porenwasserunterdruckentwicklung zu beobachten, die bei den Miozän-Tönen am größten

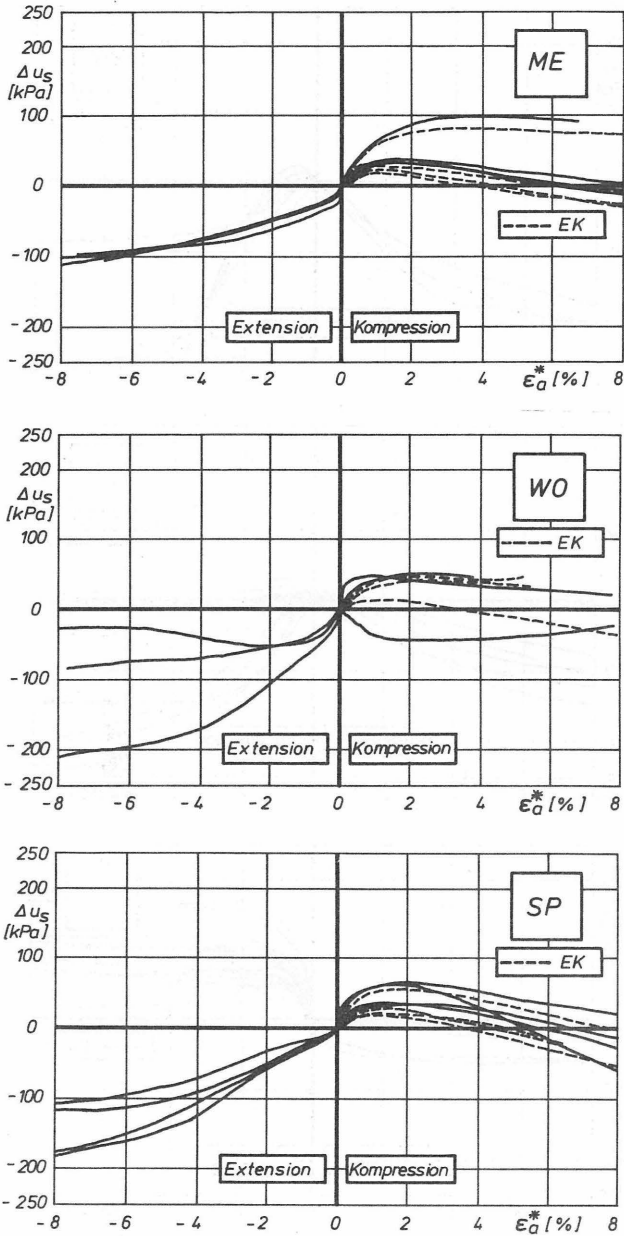


Bild 60: Porenwasserdruckänderung Δu_s als Funktion der axialen Dehnung (Töne ME, WO, SP)

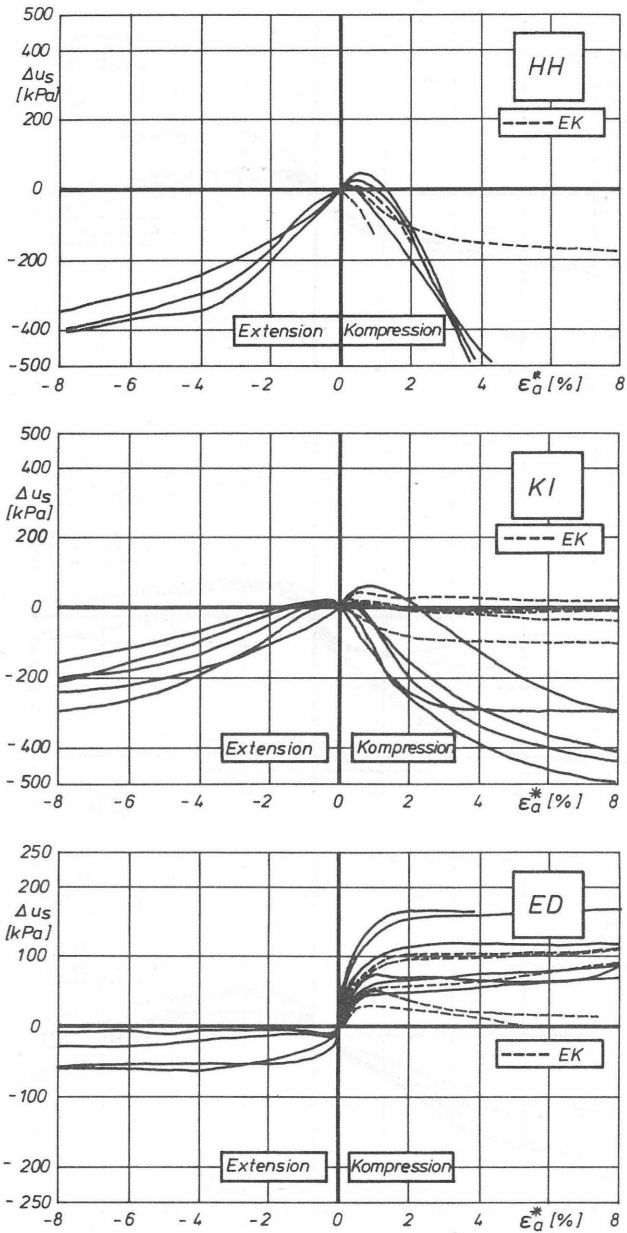
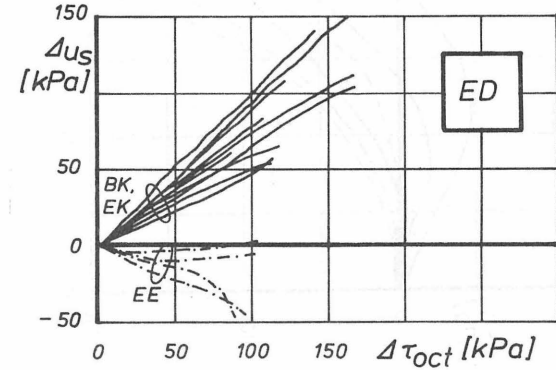
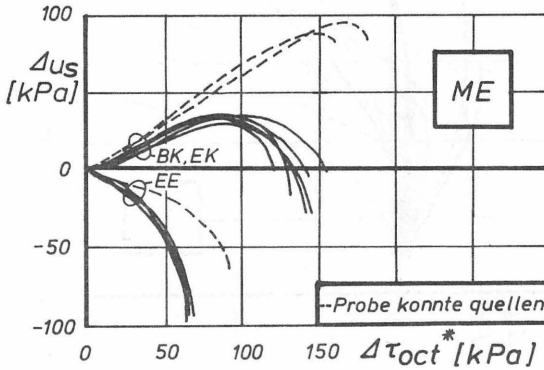
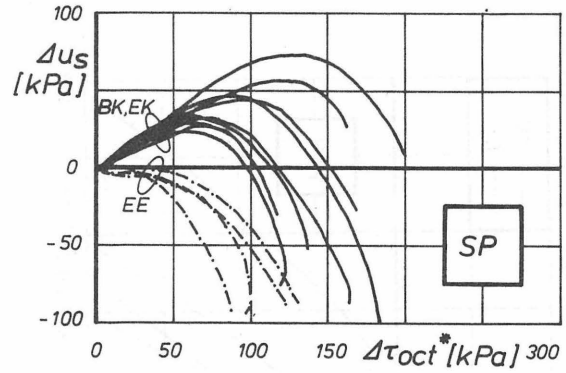
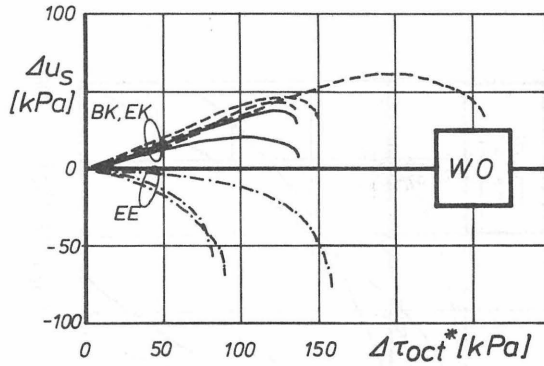


Bild 61: Porenwasserdruckänderung Δu_s als Funktion der axialen Dehnung (Tone HH, KI, ED)

Bild 62: Porenwasserdruckänderung aus Schubbeanspruchung als Funktion der oktaedrischen Schubspannungsänderung, Tone ME, WO, SP, ED



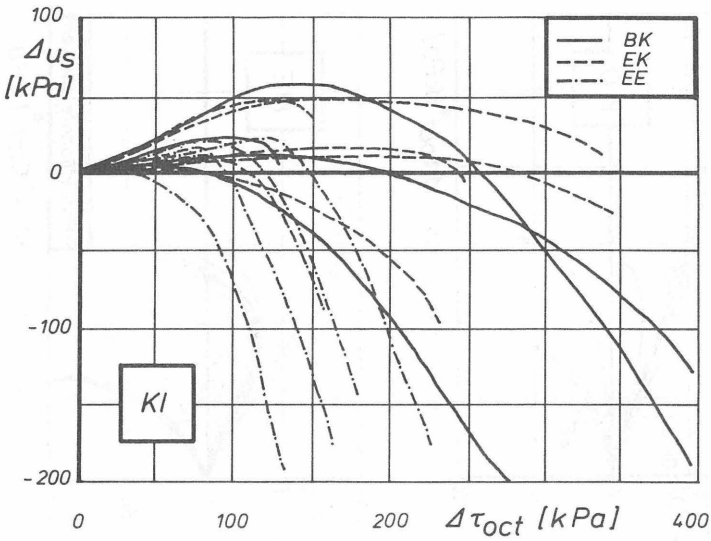
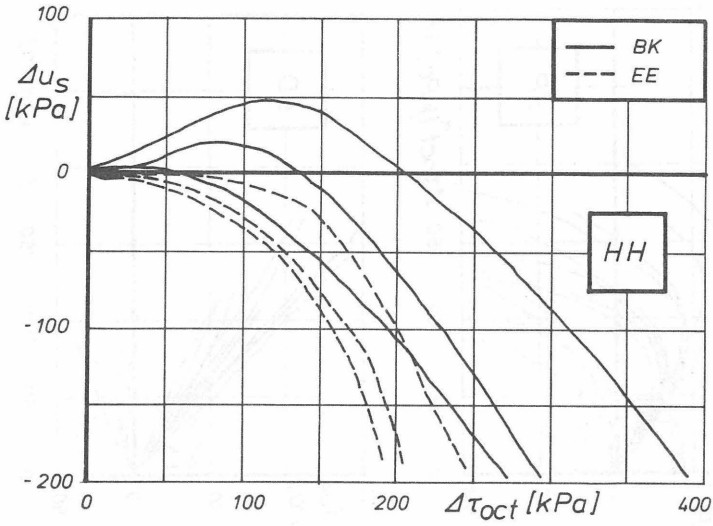


Bild 63: Porenwasserdruckänderung aus Schubbeanspruchung als Funktion der oktaedrischen Schubspannungsänderung, Tone HH, KI

und beim Lauenburger Ton am geringsten ist und von Belastungsbeginn an eine Tendenz zu dilatantem Verhalten anzeigt.

Bei allen Tönen und Kompressionsbelastung ist nach dem Auftreten eines Δu_s -Maximums ein Rückgang des Porenwasserüberdruckes zu beobachten, nur der Lauenburger Ton zeigt dieses Verhalten in nur 2 Teilversuchen (EK). Das Δu_s -Maximum tritt bei Dehnungen auf, die deutlich unter denen für r'_{extr} liegen. Eine Tendenz zu dilatantem Verhalten zeigen die Töne bei Kompressionsbelastung also erst nach signifikanten Dehnungen, aber bereits deutlich vor Erreichen des Grenzzustandes.

Die Darstellung des Zusammenhanges $\Delta u_s = f(\Delta \tau_{oct})$ ermöglicht eine Beurteilung der Änderung der a-Parameter nach HENKEL (siehe 2.2.4), die als Steigung der Kurven geometrisch interpretiert werden können. Bei Kompressionsbelastung tritt bei allen Tönen ein nahezu linearer Anfangsbereich mit positiven a-Werten auf. Ein Vergleich dieser a-Werte im Anfangsbereich mit den a_f -Werten bei r'_{extr} (Bild 64) verdeutlicht die großen Änderungen im Versuchsverlauf.

Bei Extensionsbelastung liegen die a-Werte bereits im Anfangsbereich unter 0 (Bilder 62 und 63), lediglich der Miozän-Ton KI zeigt bei 3 Teilversuchen positive a-Werte. Dort tritt bei Extension und Dehnungen bis 1% eine Tendenz zu kontraktantem Verhalten auf, bevor dann mit stark abfallenden a-Werten auch hier wieder dilatantes Verhalten angedeutet wird.

	e(-)	BK				EK				EE			
		a_1		a_f		a_1		a_f		a_1		a_f	
		von	bis	a_f	s	von	bis	a_f	s	von	bis	a_f	s
ME	0,60	0,5	0,4	0,1	0,2	0,5	0,4	0,1	0,3	-0,3	-0,6	-0,8	0,1
WO	0,82	0,3	0,7	0,1	0,2	0,3	0,7	0,3	0,1	-0,1	-0,3	-0,5	0,1
SP	0,55	0,4	0,8	-0,2	0,1	0,4	0,8	-0,2	0,2	-0,1	-0,2	-0,9	0,1
HH	0,4	0,2	0,5	-0,7	0,1	0,2	0,5	-0,2	0,2	-0,6	-0,2	-1,1	0,1
KI	0,55	-1	0,5	-0,6	0,1	-0,1	0,4	0,0	0,2	0,2	0,3	-0,4	0,2
ED	0,87	0,5	1,0	0,7	0,2	0,5	1,0	0,6	0,2	-0,4	-0,3	-0,3	0,2

a_1 : a-Wert im linearen Anfangsbereich der $\Delta u_s = f(\tau_{oct})$ -Kurven
s: Standardabweichung

Bild 64: Porenwasserdruckbeiwerte, a_f bei r'_{extr}

Die Abhängigkeit der Porenwasserdruckbeiwerte von der Überkonsolidation ist vielfach beschrieben und nachgewiesen worden. Da ein Überkonsolidierungsverhältnis bei den hier untersuchten Tönen nicht genau angegeben werden kann und die a_f -Werte der Einzelversuche keine Abhängigkeit von dem Spannungsniveau beim Versuch erkennen lassen, wird hier die Abhängigkeit der a_f -Werte von der Porenzahl e untersucht.

Es ergeben sich signifikante Zusammenhänge (Bild 65) bei allen Belastungsarten. Mit steigender Dichte nehmen die a_f -Werte ab und erreichen bei Porenzahlen zwischen 0,65 und 0,58 bei Kompression die $a_f=0$ -Linie. Bei Extension wird die Nulllinie offensichtlich, wenn die im Bild eingetragene Ausgleichsgerade extrapoliert werden kann, bei Porenzahlen um 1,0 überschritten.

Diese Bewertung des Porenwasserdruckverhaltens gilt nur für den Grenzzustand, bei kleinen Belastungen oder Dehnungen werden andere Porenwasserdruckänderungen beobachtet.

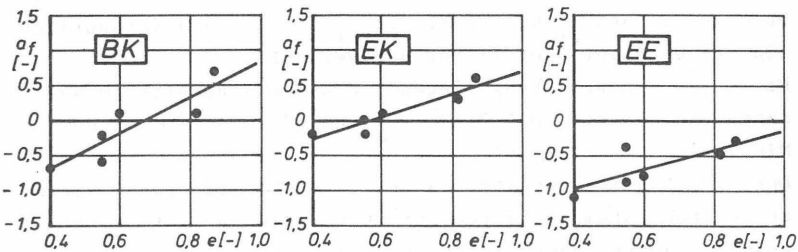


Bild 65: Porenwasserdruckbeiwerte a_f als Funktion der Porenzahl bei Einbau

Zusammenfassend ist festzuhalten:

Die Tone zeigen trotz teilweise hoher Überkonsolidation bei Kompression am Belastungsbeginn zunächst eine mehr oder weniger starke Tendenz zu kontraktantem Verhalten, angedeutet durch einen weitgehend linearen Anstieg des Porenwasserüberdruckes aus reiner Schubbeanspruchung. Bei allen Tönen mit Ausnahme des Tons ED folgt dann eine wachsende Tendenz zu dilatantem Verhalten. Bei Extension tritt mit einer Ausnahme in allen Fällen ab Belastungsbeginn eine Tendenz zu dilatantem Verhalten auf. Bei dem Ton KI besteht selbst bei Extension zunächst das Bestreben, auf die Entspannungsdeh-

nungen in horizontaler Richtung in-situ und Spannungsänderungen im Versuch anfangs mit kontraktanten Dehnungen zu reagieren.

Der Lauenburger Ton ED zeigt bei Kompression keine und bei Extension nur schwache Neigungen zu dilatantem Verhalten. Die Porenwasserdruckbeiwerte für den Bruchzustand (r'_{extr}) korrelieren signifikant mit den Porenzahlen der Tone. Die Tendenz zu dilatantem Verhalten im Bruchzustand ist also deutlich von der Dichte der Tone und von der Beanspruchungsart (Kompression oder Extension) abhängig.

6.3.3.5 SCHERPARAMETER

Die Scherparameter ϕ' und c' wurden in allen Fällen über eine lineare Regression aus den q/p' -Werten für das Bruchkriterium r'_{extr} errechnet. Trotz der aus statistischer Sicht geringen Fallzahl ist diese Verfahrensweise am objektivsten.

Die Streuung der Bruchpunkte (Bilder 66 und 67) ist für ungestörte und überkonsolidierte Tone normal. Die Versuchsreihen WO und HH-Entlastungskompression wurden wegen zu geringer Versuchsanzahl im Hinblick auf Grenzzustände nicht weiter ausgewertet.

Der Lauenburger Ton zeigt mit $9,4^\circ$ und $12,6^\circ$ die geringsten, der Miozän-Ton HH mit $32,4^\circ$ und $33,8^\circ$ die höchsten Reibungswinkel.

Der Ton ED besitzt jedoch mit $c' = 74,2$ kPa und $70,2$ kPa die mit Abstand höchsten Kohäsionswerte, so daß seine Grenzbedingungen bei Spannungen unter $p' = 200$ kPa größere deviatorische Beanspruchungen q zulassen als die Grenzbedingungen der meisten anderen Tone (Bild 68).

Der Kreide-Ton ME zeigt keine Kohäsion.

BELASTUNG/ENTLASTUNG

Die Unterschiede in den Scherparametern für Belastungskompression und Entlastungskompression sind bei den Tönen ME, SP und ED vernachlässigbar gering und liegen im Bereich der Wertestreuung (Bild 67). Die Scherparameter können für diese Tone deshalb zusammengefaßt werden (Bild 69).

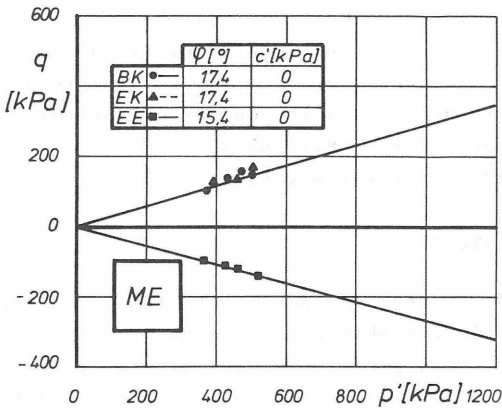
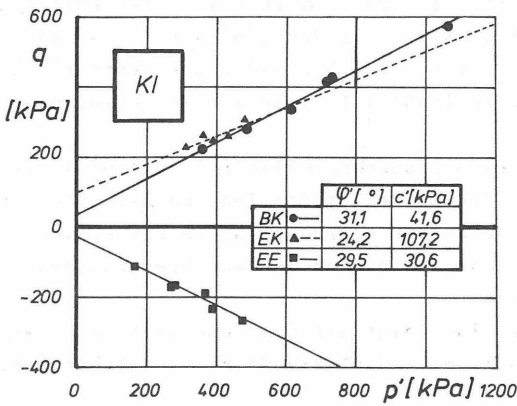
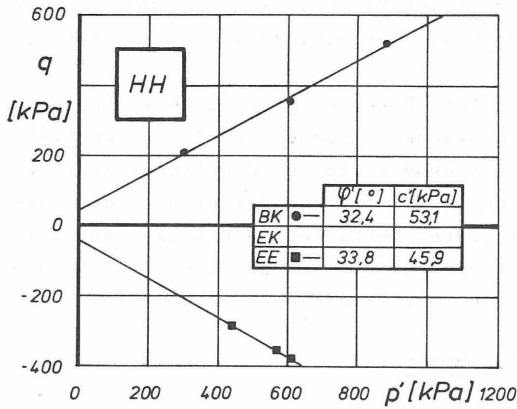


Bild 66: Grenzbedingungen der Tone HH, KI und ME

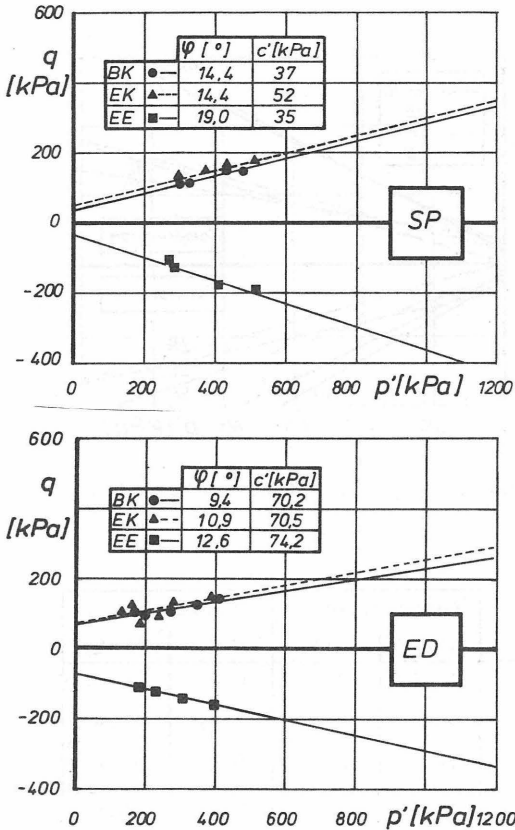


Bild 67: Grenzbedingungen der Tone SP und ED

Bei dem Miozän-Ton KI sind die Unterschiede hingegen deutlich. Für Vergleichszwecke werden auch hier mittlere Scherparameter für EK und BK angegeben.

KOMPRESSION/EXTENSION

Die bei allen Tönen beobachtete geringere Streuung der Versuchsergebnisse bei Extension, die auf vergleichsweise geringere Bruchdehnungen zurückgeführt werden kann, ermöglicht einen Vergleich mit den Ergebnissen der Kompressionsversuche trotz geringerer Versuchsanzahl (Bild 70).

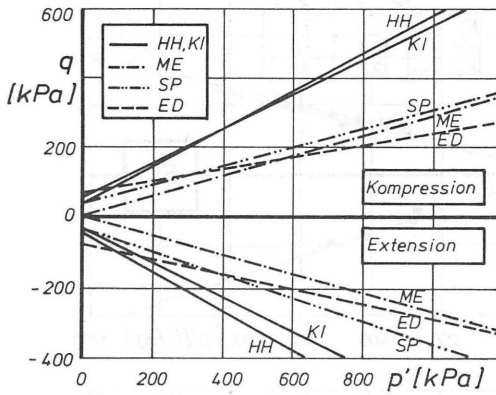


Bild 68: Grenzbedingungen der Tone - Überblick

	Kompression		Extension	
	$\phi' (^{\circ})$	$c' \text{ (kPa)}$	$\phi' (^{\circ})$	$c' \text{ (kPa)}$
ME	17,4	0,0	15,4	0,0
HH	32,4	53,1	33,8	45,9
KI	28,5	69,2	29,5	30,6
SP	14,7	38,9	19,0	35,0
ED	9,5	72,4	12,6	74,2

Bild 69: Scherparameter aus Kompressions- und Extensionsversuchen

Die Reibungswinkel für Extension sind bei 4 der 5 Tone zwischen 4% und 33% höher als bei Kompression. Der Kreide-Ton zeigt ein anderes Verhalten. Die Differenzen zwischen ϕ'_E und ϕ'_K betragen 3% bis 24% des Reibungswinkels bei Extension (Bild 70) und sind bei den Miozän-Tonen mit Abstand (3%, 4%) am geringsten.

Ein Zusammenhang zwischen der Porenzahl e und der Kohäsion c' ist nicht erkennbar. Die Reibungswinkel korrelieren hingegen signifikant mit der Porenzahl e (Bild 71).

	$\Delta\phi'$	$\Delta\phi'/\phi_E$	ϕ'_E/ϕ'_K	$\Delta c'$	$\Delta c'/c'_E$	c'_E/c'_K
ME	2,0	12 %	0,89	0,0	0,0 %	0,0
HH	1,4	4 %	1,04	7,2	15,0 %	0,86
KI	1,0	3 %	1,04	2,1	6,9 %	0,44
SP	4,3	22 %	1,29	3,9	11,0 %	0,90
ED	3,1	24 %	1,33	1,8	2,0 %	1,03

$$\Delta\phi' = \phi'_E - \phi'_K$$

$$\Delta c' = c'_E - c'_K$$

Bild 70: Absolute und bezogene Unterschiede der Scherparameter für Kompression und Extension

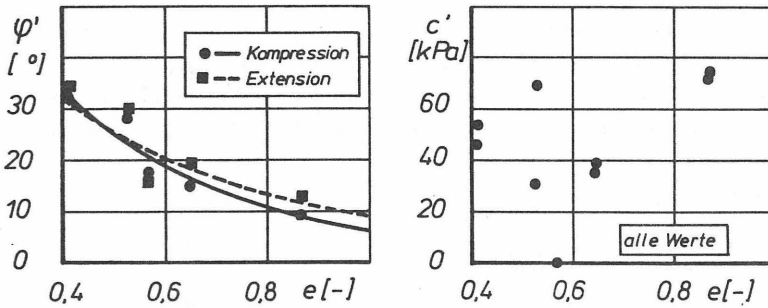


Bild 71: Zusammenhänge zwischen Scherparametern und Porenzahl

Kompression: $\phi' = 74 \cdot \exp(-2,11 \cdot e)$; $r=0,86$; $s=0,25$

Extension : $\phi' = 101 \cdot \exp(-2,79 \cdot e)$; $r=0,95$; $s=0,17$

6.4 STANDARDTRIAxIALVERSUCHE

6.4.1 VORBEMERKUNGEN

Die im Normenentwurf DIN 18137, Teil 2 behandelten Triaxialversuche, hier als Standardversuche bezeichnet, sind Belastungs-Kompressionsversuche (Bruch durch weggesteuerte Erhöhung der axialen Spannung) mit isotroper Konsolidation nach vorheriger Sättigung.

Mit der für diese Versuche vorhandenen Versuchsanlage wurden Richtungsabhängigkeiten bei Scherversuchen durch Untersuchung von je Ton horizontalen ($\beta = 90^\circ$) und vertikalen ($\beta = 0^\circ$) Proben festgestellt.

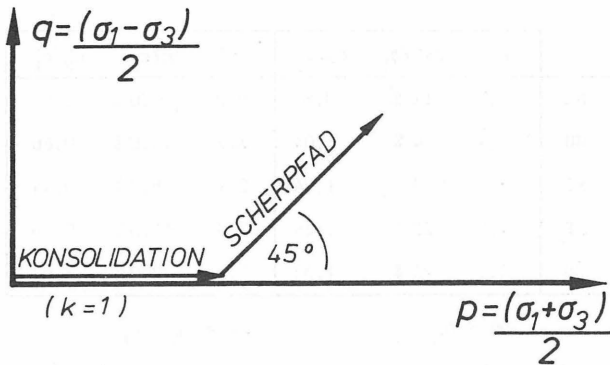


Bild 72: Totalspannungspfade der Standardtriaxialversuche

Die Ergebnisse werden mit denen der Versuche mit verschiedenen Spannungspfaden verglichen. Versuchsgeschwindigkeiten und Sättigungsdrücke wurden nach dem Normentwurf festgelegt. In der Scherphase wurde bei 0,3% Dehnung eine Entlastung auf $q = 0$ eingefügt, aus der ein Ent-/Wiederbelastungsmodul berechnet wurde.

6.4.2 VERSUCHSERGEBNISSE

Die Versuche wurden im Hinblick auf das Verformungsverhalten und die Scherparameter ausgewertet, wobei die Richtungsabhängigkeit der Parameter im Vordergrund stand. Die Spannungspfade der Standardversuche ähneln denen der BK-Versuche mit anisotroper Konsolidation. Lediglich die Pfade der $\beta = 90^\circ$ - Versuche des Lauenburger Tons ED zeigen ein weniger kontraktantes Verhalten (Bilder 73 und 74). Ein zu Beginn der Pfade allgemein etwas stärkerer Porenwasserdruckanstieg bei den Standardversuchen kann auf die nicht unterbundenen Quellvorgänge zurückgeführt werden. Die Tone zeigen, wie auch aus den Spannungspfaden erkennbar ist, keine ausgeprägten Spitzenwerte in den Arbeitslinien. Die Bruchverformungen liegen für das Kriterium $r'_{\max}$ ähnlich wie bei den unter Punkt 6.2 beschriebenen Versuchen teilweise deutlich unter denen für $q_{\max}$.

Die Scherparameter der isotropen Versuche können mit Ausnahme des Tones HH (dort verschiedene Entnahmetiefen) mit

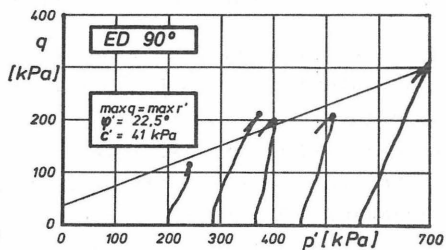
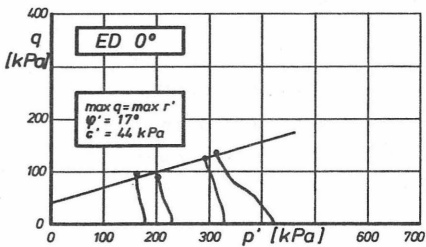
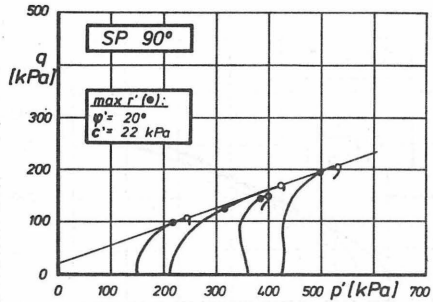
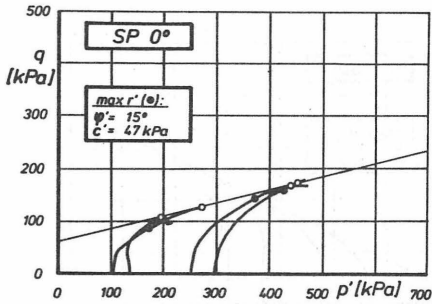
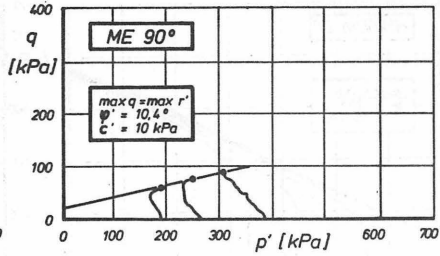
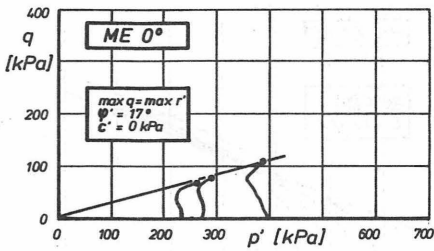


Bild 73: Spannungspfade von richtungsorientiert untersuchten Proben im Standardtriaxialversuch (ME, SP, ED)

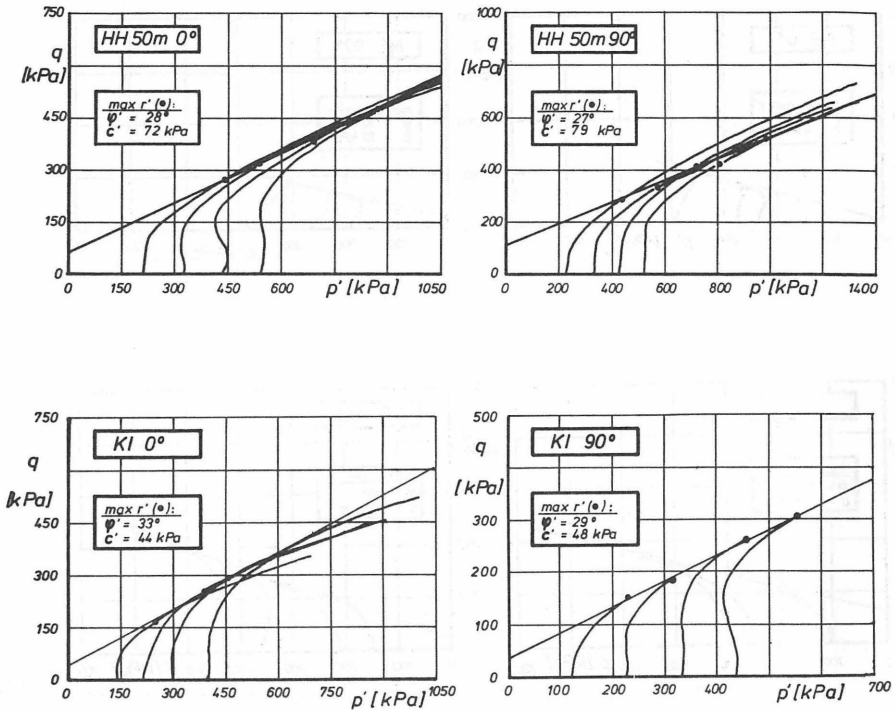


Bild 74: Spannungspfade von richtungsorientiert untersuchten Proben im Standardtriaxialversuch (HH, KI)

denen der anisotropen Versuche verglichen werden. Die zu beobachtenden Unterschiede sind beim Unterkreide-Ton ME am geringsten (nur bei diesem Ton wurde aufgrund seiner bekannten Quellfähigkeit vor der Sättigung ein isotroper Spannungszustand von $\gamma \cdot h \approx 220$ kPa eingestellt) und beim Lauenburger Ton ED am größten (Bild 73). Die restlichen Tone zeigen Unterschiede, die im Bereich der beobachteten Streuung liegen.

Die hohe Abweichung beim Lauenburger Ton ED ist darauf zurückzuführen, daß die Proben trotz Entnahme direkt neben dem Entnahmepunkt der Proben für die anisotropen Versuche

einen höheren Grobschluffanteil und mit $e = 0,81$ eine niedrigere Porenzahl zeigten.

Insgesamt zeigt sich, daß die Grenzbedingungen der Tone ME und KI für verschiedene Belastungsfälle (Bild 75) relativ dicht beieinander liegen. Bei dem Rupel-Ton SP sind sowohl zwischen Kompression und Extension wie auch zwischen Belastung bei unterschiedlichen Entnahmerichtungen deutliche Unterschiede besonders beim Reibungswinkel zu beobachten. Auch der Lauenburger Ton ED besitzt für die 0° -Belastung einen erheblich anderen Reibungswinkel als für die 90° -Belastung bei nahezu gleicher Kohäsion.

		Kompression	Extension	$\beta = 0^\circ$	$\beta = 90^\circ$
ME	ϕ'	17,4	15,4	17,0	16,9
	c'	0	0	0	0
SP	ϕ'	14,7	19,0	15,0	20,8
	c'	38,9	35,0	47,0	22,0
HH	ϕ'	32,4	33,8	28,0	27,0
	c'	53,1	45,9	72,0	79,0
KI	ϕ'	28,5	29,5	33,0	29,0
	c'	69,2	30,6	44,0	48,0
ED	ϕ'	9,5	12,6	17,0	22,5
	c'	72,4	74,2	44,0	41,0

$\phi'(^{\circ})$, c' (kPa)

Bild 75: Gegenüberstellung der Scherparameter aller Versuche

Zur Beurteilung des Verformungsverhaltens bei verschiedenen Entnahmerichtungen werden die Moduli E_{dil} und E_{di2} verwendet, deren Definition der von $E_{dal,2}$ (Bild 57) entspricht. Zusätzlich wird der Modul E_{diw} bewertet, der aus der bei den Standardversuchen stets durchgeführten Ent-/Wiederbelastung errechnet wurde.

Die absoluten Steifigkeiten der Tone bei der Vergleichsspannung von 350 kPa (Bild 76) sind mit Ausnahme des Tons ME, der bei diesen Versuchen in der Sättigungsphase schwach quellen konnte, ähnlich hoch wie die in den anisotropen

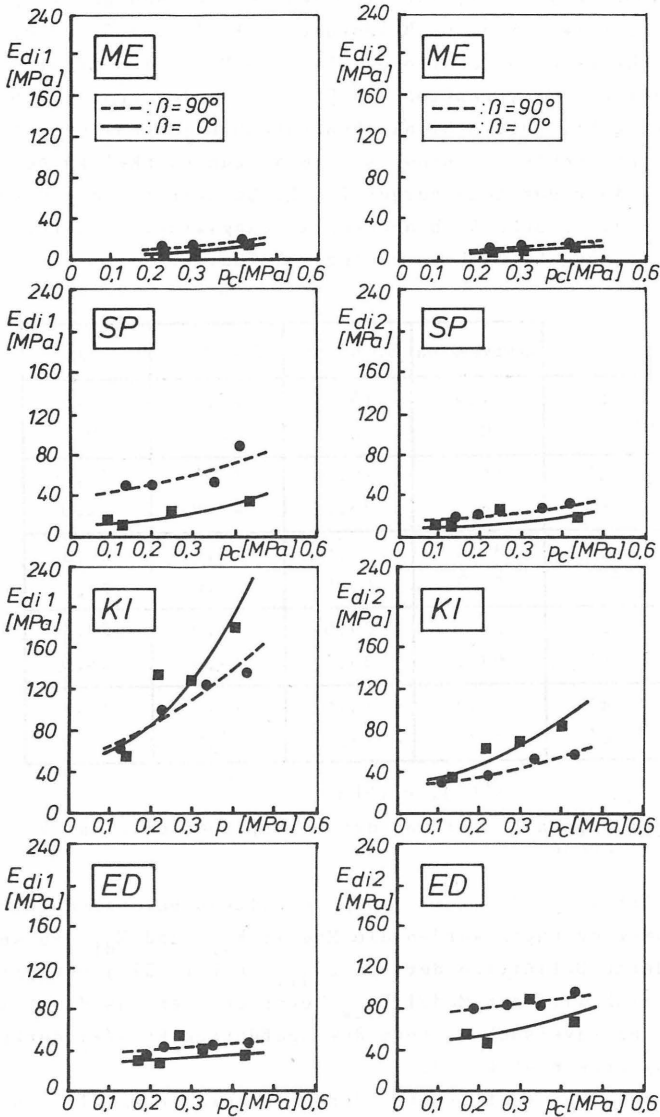


Bild 76: Sekantenmoduli bei verschiedenen Entnahmerichtungen als Funktion des Konsolidationsdruckes

Versuchen ermittelten Steifigkeiten (BK). Die 90°-Proben besitzen bei allen Tönen eine höhere Steifigkeit als die 0°-Proben. Die errechenbaren Anisotropiewerte α_{i1} , α_{i2} und α_{iw} zeigen die gleiche Tendenz wie die α_{a1} - und α_{a2} -Werte (Bild 77), sind allerdings geringer. Die hier geringere beobachtete Anisotropie ist auf die bei diesen Versuchen möglichen Quellvorgänge während der Sättigung und auf die mit $K = 1,0$ durchgeführte Konsolidation zurückzuführen. Bei Eigenspannungszuständen mit $K_0 > 1$ bedeutet der isotrope Konsolidationsspannungszustand bereits eine vorweggenommene Kompressionsbelastung.

Die beobachteten Steifigkeiten und die Anisotropie nehmen mit zunehmenden Dehnungen ($E_{dil} \rightarrow E_{di2}$) ab. Die sehr hohen Ent-/Wiederbelastungsmoduli E_{diw} (Bild 77) zeigen, daß in den Tönen bereits nach sehr kleinen Dehnungen nicht rückgewinnbare, plastische Verformungen auftreten, die bei einem Beanspruchungswechsel zu sehr hohen Steifigkeiten führen. Auch bei diesen Versuchen zeigt sich wieder die Ausnahmestellung des Miozän-Tons KI.

	$\beta = 0^\circ$			$\beta = 90^\circ$			$90^\circ / 0^\circ$		
	E_{dil}	E_{diw}	E_{di2}	E_{dil}	E_{diw}	E_{di2}	α_{i1}	α_{iw}	α_{i2}
ME	12,7	21,0	11,7	14,8	70,0	14,7	1,2	3,3	1,3
SP	28,0	75,7	19,2	66,5	134,0	28,3	2,4	2,3	1,5
KI	161,0	194,0	79,4	120,0	190,0	50,4	0,8	1,0	0,6
ED	57,7	81,6	34,1	87,4	203,0	43,7	1,5	2,5	1,3

Bild 77: Sekantenmoduli und Anisotropiewerte für die Vergleichsspannung von 350 kPa

6.5 BEOBACHTETE BESONDERHEITEN

Die Triaxialversuche haben neben den bodenmechanisch interpretierbaren Resultaten auch solche erbracht, für deren Interpretation Untersuchungen zum Mineralbestand und Gefüge erforderlich oder nützlich sind.

Wichtigstes Ergebnis ist auch hier die bei Gebrauchsspannungen (z.B. in der Konsolidationsphase und bei beginnender

Scherbelastung) festgestellte ausgeprägte Anisotropie. Im einzelnen sind folgende Beobachtungen festzuhalten:

T-1: Die Tone ME, SP und WO zeigen auch bei einem mittleren Druck von 100 kPa noch Quellttendenzen. Die Gegensteuerung führt schließlich zu mittleren Drücken p bis 300 kPa (ME).

T-2: Die Tone zeigen in der Konsolidationsphase ($K=1,2$) eine lineare Zunahme der Axial- und Volumendehnung mit steigendem mittleren Druck p .

T-3: Die horizontale Zusammendrückbarkeit ist mit Ausnahme des Miozän-Tons KI in der Konsolidationsphase bei allen untersuchten Tönen geringer als die vertikale Zusammendrückbarkeit. Der Unterschied zwischen beiden ist bei den Miozän-Tönen am geringsten, beim Rupel-Ton SP am größten. Die Tone zeigen also teilweise schwach, teilweise hoch anisotropes Verhalten.

T-4: Das Verformungsverhalten in der Konsolidationsphase ist deutlich von der Porenzahl der Tone abhängig.

T-5: Die Arbeitslinien $q=f(\epsilon_a)$ zeigen nur beim Lauenburger Ton ED eindeutige Bruchwerte, bei allen anderen Tönen steigt der Deviator mit wachsender Dehnung weiter an oder nähert sich asymptotisch einem Extremwert. Die Arbeitslinien $r'=f(\epsilon_a)$ zeigen häufiger Extremwerte. Die Bruchdehnungen liegen beim Rupel-Ton sehr hoch, bei den Miozän-Tönen und beim Lauenburger Ton vergleichsweise niedrig.

T-6: Das Verformungsverhalten bei der rotationssymmetrischen, hier volumenkonstanten Scherbeanspruchung ist stark pfadabhängig. Bei allen dazu ausgewerteten Tönen zeigt sich bei beginnender Belastung (bis um 0,5% Dehnung mindestens), daß die Steifigkeit bei Entlastungskompression größer als bei Belastungskompression ist. Der Vergleich Kompression/Extension ergibt die größten Unterschiede im Verformungsverhalten, die wiederum bei den Miozän-Tönen am geringsten und bei den Tönen ME und SP am größten sind.

T-7: Die Arbeitlinien der untersuchten überkonsolidierten Töne können mit dem von KONDNER (1963) vorgestellten hyperbolischen Ansatz nicht beschrieben werden.

T-8: Bei Kompressionsbelastung zeigen alle Tone bei beginnender Dehnung eine verschieden stark ausgeprägte, lineare Zunahme des Porenwasserdruckes aus oktaedrischer Schubspannungsänderung, die als Neigung zu kontaktantem Verhalten interpretiert werden kann. Der Lauenburger Ton zeigt hierbei die größte Porenwasserdruckänderung, die Miozän-Töne die geringste. Unterschiede zwischen Be- und Entlastung treten nicht auf. Nach Dehnungen zwischen 0,5% und 2% nimmt die Tendenz zu dilatantem Verhalten dann zu (Porenwasserdruckabnahmen) und bestimmt maßgeblich das weitere Verhalten. Der Lauenburger Ton zeigt allerdings nur Porenwasserdruckzunahmen bei Kompression. Bei Extension tritt bei den Tönen (Ausnahme: KI) von Dehnungsbeginn an eine als Tendenz zu dilatantem Verhalten

interpretierbare Porenwasserdruckabnahme auf. Die im Grenzzustand gemessenen Porenwasserdruckbeiwerte α_f korrelieren eindeutig mit den natürlichen Porenzahlen der Tone.

T-9: Die Miozän-Tone besitzen die mit Abstand höchsten Reibungswinkel. Ihre Kohäsionen werden nur vom Lauenburger Ton übertroffen. Die Reibungswinkel bei Kompressions- und Extensionsbelastung liegen relativ dicht beieinander. Die Miozän-Tone zeigen auch hier die geringsten Unterschiede. Auffallend ist die beim Unterkreide-Ton ME fehlende Kohäsion.

T-10: Ein Zusammenhang zwischen der Kohäsion und der Porenzahl, der auftreten könnte, ist hier nicht zu beobachten. Der Reibungswinkel hingegen nimmt mit wachsender Porenzahl (fallender Dichte) signifikant ab.

T-11: Die Standardtriaxialversuche an richtungsorientiert entnommenen Proben ergeben ebenfalls ein deutlich anisotropes Verhalten der Tone, das in Tendenz und Größenordnung mit dem bei den vorausgegangenen Versuchen beobachteten Verhalten übereinstimmt. Die Tone sind in horizontaler Richtung in dem untersuchten Spannungsbereich wesentlich steifer als in vertikaler Richtung.

T-12: Die Scherparameter aus den Standardtriaxialversuchen unterscheiden sich von denen der anisotropen Versuche nur im Rahmen der ohnehin zu beobachtenden Streuung. Der Rupel-Ton und der Lauenburger Ton zeigen für die 2 untersuchten Richtungen unterschiedliche Reibungswinkel, wobei die Unterschiede ähnlich hoch wie die zwischen Kompressions- und Extensionsversuchen bei den gleichen Tönen jeweils sind.

7. INGENIEURGEOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

7.1 VORBEMERKUNGEN UND FRAGESTELLUNG

Mit den ingenieurgeologischen Untersuchungen sollen Stoffeigenschaften gefunden werden, mit denen die beobachteten Besonderheiten im bodenmechanischen Verhalten interpretiert oder präziser als bereits geschehen gedeutet werden können. Neben Einflüssen der Stoffzusammensetzung werden Einflüsse der Mikrostruktur erwartet.

Die Untersuchungen umfassen deshalb die Bestimmung des Mineralbestandes und der Mikrostruktur mit verschiedenen Methoden.

7.2 UNTERSUCHUNG DES MINERALBESTANDES

Der Quarzgehalt der Tone wurde röntgenographisch nach WIEGMANN & KRANZ (1961) bestimmt. Der Kohlenstoffgehalt, der

sich bei den Sedimenten im wesentlichen aus Karbonaten und organisch gebundenem Kohlenstoff zusammensetzt, konnte quantitativ mit einer LECO-Apparatur bestimmt und über eine Auswertung von Röntgendiffraktometerkurven in Calcit- und Dolomitanteile aufgeteilt werden. Mit der LECO-Apparatur wurde auch der Schwefelgehalt quantitativ bestimmt und in Pyrit- bzw. Markasitanteile umgerechnet.

Die Bestimmung der Tonminerale und ihrer Mengenanteile geschah röntgenographisch in Anlehnung an THOREZ (1975). Dazu wurden die Proben mit verdünnter Salzsäure von den Karbonaten befreit und neutralisiert. Anschließend wurden die Fraktionen $<20\mu$ abgetrennt und der beim nachfolgenden Zentrifugieren erhaltene Bodensatz so auf einem Objektträger aufgebracht, daß von einer parallelen Orientierung der Tonminerale zum Objektträger ausgegangen werden konnte. Die Proben wurden dann nach Lufttrocknung, Glykol- und Hitzebehandlung geröntgt (Bild 78). Die erhaltenen Ergebnisse (Bild 79) stellen eine halbquantitative Bestimmung des Mineralbestandes dar. Mit einer IR-spektroskopischen Phasenanalyse konnten die Ergebnisse bestätigt werden.

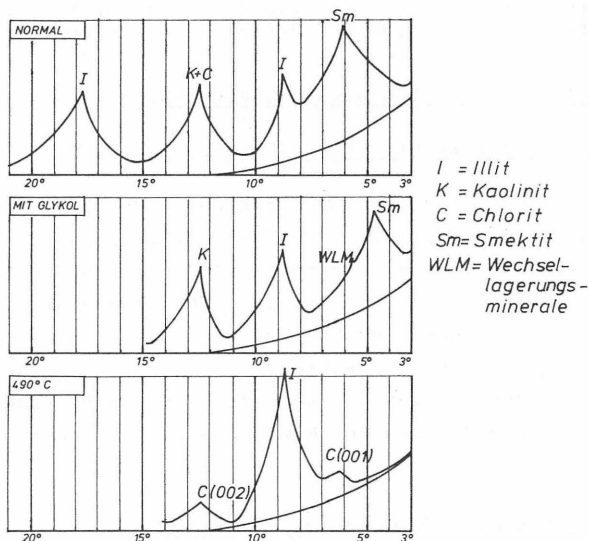


Bild 78: Röntgendiffraktometerkurven (Beispiel Rupel-Ton)
(y-Achse: Intensität)

Auffallend sind neben dem sehr hohen Karbonatanteil beim Rupel-Ton SP die hohen Glaukonitanteile bei den Miozän-Tonen, die einhergehen mit einem vergleichsweise geringen Gehalt an weiteren Tonmineralen. Der Kreide-Ton ME zeigt einen hohen Anteil an Wechsellagerungsmineralen, der Quellfähigkeit bedeuten kann. Auch die signifikanten Smektitgehalte der Tone ED und SP können Ursachen für Quellverhalten sein.

	ME	SP	HH	KI	ED
Quarz	8	7	10	13	8
Calcit	2		10	1	7
Dolomit	1	24	2	1	3
Pyrit	2	1	2	2	1
Organische Anteile*	3	1	3	3	2
Feldspäte*	2	3	4	3	2
Sonstige Nichttone*	3	2	3	3	3
Glaukonit*	-	-	20	25	-
Kaolinit	16	5	4	3	12
Illit + Glimmer**	37	23	30	37	26
Wechsellagerungsminerale	18	10	7	7	12
Smektit	-	16	-	-	18
Chlorit	8	8	5	2	6

*: aus weiteren Untersuchungen abgeleitete Schätzungen

** : bei den Miozän-Tonen: vorwiegend Muskovit

alle Angaben in %

Bild 79: Mineralbestand der untersuchten Tone

Das in den Miozän-Tonen beobachtete Glaukonit-Mineral ist ein nur in marinem Milieu entstehendes, durch untermeerische Mineralumbildung oder -neubildung (Halmyrolyse) gebildetes, an seiner grünen Farbe erkennbares Tonmineral. Glaukonitkonkretionen werden häufig in den Schalen von Porrentierchen gefunden und können in Dünnschliffen aufgrund ihrer Größe recht gut identifiziert werden.

7.3 UNTERSUCHUNG DER MIKROSTRUKTUR

Die Mikrostruktur der Tone wurde mit 3 Verfahren untersucht. Zur Beurteilung eines größeren Probenbereiches wurden Dünnschliffe im Lichtmikroskop betrachtet, für die qualitative Beschreibung des Mikrogefüges wurden die Tone im Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht. Zur Ermittlung von Einregelungsgraden der Tonminerale dienten Röntgentexturanalysen.

Für die Untersuchungen war eine Entwässerung und Stabilisierung der Tonproben erforderlich. Dies geschah nach Vorversuchen durch Anwendung von Polyäthylenglykol verschiedenen Polymerisationsgrades (Carbowax 200 bis 6000, Carbowax 200 und 600 sind bei Raumtemperatur flüssig). Dieser Stoff ist mit Wasser beliebig mischbar, durch die Wirkung von Oberflächenspannungen und Dichteunterschieden verdrängt das Carbowax das Wasser aus den Poren und dringt in die Probe ein. Die Proben wurden zunächst 48 Std. in Carbowax 200 (niedriger Polymerisationsgrad) und dann 3 bis 4 Tage in Carbowax 600 (höherer Polymerisationsgrad) bei 60°C belassen. Mit dieser Verfahrensweise konnte ein Druckschock, der bei sofortiger Behandlung mit einem Polyäthylenglykol hohen Polymerisationsgrades auftrat, vermieden werden. Nach durchgeführter Dehydratisierung erfolgte die Entfernung des Carbowax durch mehrtägige Chloroformbäder. Schließlich wurden die Proben 4 bis 5 Std. mit einem Polyuretan-Harz (G-4, Firma Vosschemie GmbH) behandelt, das sehr dünnflüssig ist, gut in die Porenräume eindringt und in 6 bis 7 Tagen auch bei Anwesenheit von Restfeuchtigkeit aushärtet. Dieses Verfahren führte immer dann zu einem guten Erfolg, wenn die Proben vollständig dehydratisiert werden konnten, da im anderen Falle der Aushärtungsprozess begünstigt durch das noch vorhandenen Wasser zu schnell und meist unvollständig ablief.

Nach Aushärtung konnten die Proben dann je nach Anforderung problemlos weiter bearbeitet werden.

7.3.1 LICHTMIKROSKOPISCHE UNTERSUCHUNGEN

Die Proben für die Dünnschliffe wurden mit Carbowax 400 bis 6000 dehydratisiert und dann weiter bearbeitet. Die unter-

suchungen erstreckten sich auf die Tone ED (Lauenburger Ton) und HH und KI (Miozän-Tone). Die Kreide-Tone und der Rupelton konnten wegen der nicht ausreichenden Auflösung des Lichtmikroskopes nicht untersucht werden. Die Dünnschliffe des Lauenburger Tons zeigten eine Feinschichtung aus Ton- und Schluffbändern mit Feinsandanteilen und Abständen von 0,1 bis 1 mm (Bild 80).

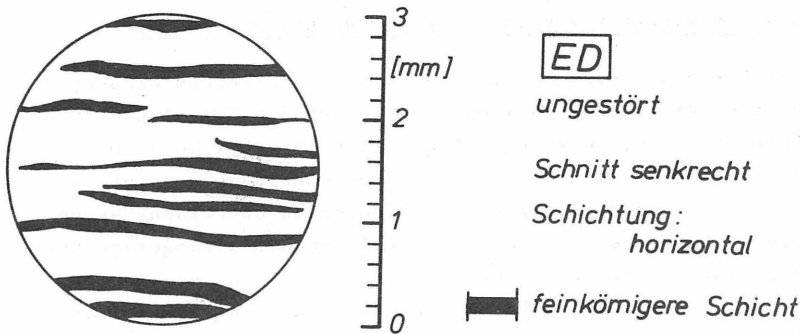


Bild 80: Resultat eines Dünnschliffes an ungestörtem Lauenburger Ton

Die Feinschichtung liegt horizontal und konnte in 2 orthogonalen senkrechten Schnitten nachgewiesen werden, so daß von einem axialsymmetrischen Gefüge ausgegangen werden kann. Die Untersuchung der Miozän-Tone zeigte ein homogenes Gefüge ohne jede optisch erkennbare Anisotropie. Die zahlreichen grünen Glaukonitteilchen fielen auf. Sie erreichen Größen bis 0,15 mm. Der ebenfalls optisch erkennbare Quarzanteil (Grobschluff und Feinsand) bildet kein eindeutig zusammenhängendes Korngerüst, obwohl die Teilchen sehr dicht beieinander liegen. Insgesamt zeigen die Miozän-Tone eine Skelettstruktur (siehe Bild 3), in die auch größere Teilchen, z.B. Pyritkörner, eingelagert sind. Die aufbereiteten und rekonsolidierten Proben zeigen lediglich einen größeren Abstand der Quarzkörner, der auf die geringere Dichte zurückzuführen ist.

Die Dünnschliffe haben insgesamt ergeben, daß der Lauenburger Ton eine sehr feine, horizontale Bänderung und der Mio-

zän-Ton ein weitgehend isotropes Gefüge, bestimmt durch die charakteristischen Fraktionen Glaukonit, Quarz und Feinstanteile, besitzen.

Es ist festzuhalten, daß Schichtungen, soweit sie bei den untersuchten Tönen auftraten, stets horizontal lagen, so daß die Lage von Schichtungen mit der bei den bodenmechanischen Untersuchungen gewählten horizontalen Richtung übereinstimmt.

7.3.2 RASTERELEKTRONENMIKROSKOPISCHE UNTERSUCHUNGEN

Die Untersuchungen der Tone am Rasterelektronenmikroskop dienten einer qualitativen Beurteilung des Tongefüges im Bereich von 0,1 bis 100µm (0,0001 mm bis 0,1 mm). Die Proben wurden in der bereits beschriebenen Weise stabilisiert. Zur Herstellung einer ungestörten Oberfläche wurde die Probe im Bereich der Sollstelle umlaufend angesägt und dann vorsichtig durch Zug geteilt. Nach Reinigung der Bruchstelle konnte die Probe dann bedampft und untersucht werden. Probenvorbereitung und -untersuchung wurden am Institut für Geologie und Paläontologie der Technischen Universität Berlin durchgeführt.

REM-Aufnahmen erfassen stets nur einen sehr kleinen Teil der Probenoberfläche. Eine eingehende Beurteilung der Proben am Gerät zur Auswahl repräsentativer Bereiche ist deshalb besonders wichtig.

Für die Tone repräsentative Aufnahmen sind in Bild 81 bis Bild 85 wiedergegeben. Neben einigen Detailaufnahmen werden die Zustände "ungestört", "aufbereitet und wiederbelastet" und "abgeschert" (Scherzone) berücksichtigt. Die Schnitte liegen bezüglich der ursprüngliche Probenorientierung senkrecht und wurden unter einem Winkel von 5° bis 30° fotografiert. Die Aufnahmen von Scherzonen wurden an senkrechten Schnitten parallel zur Hauptscherrichtung hergestellt.

a) UNTERKREIDE-TON

Der Unterkreide-Ton ME zeigt als sehr feinkörniges Sediment eine offene, porige und durch eine bevorzugt horizontale Einregelung der 1µm bis 15µm messenden Teilchen gekennzeichnete Mikrostruktur.

Bild 81a

KREIDE-TON ME
ungestörte Probe
Vertikalschnitt

10 μm

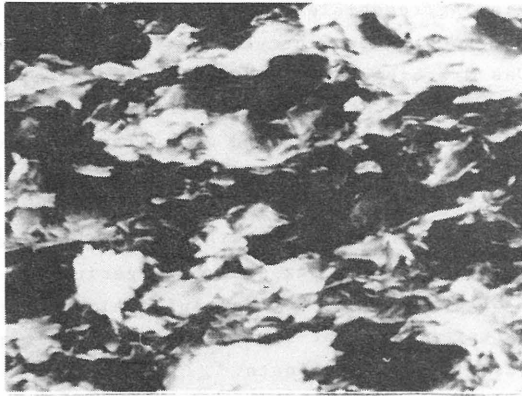


Bild 81b

KREIDE-TON ME
aufbereitete und
mit 350 kPa wie-
derbelastete
Probe

10 μm

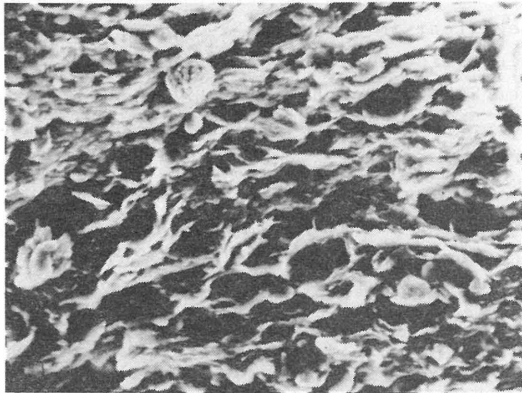
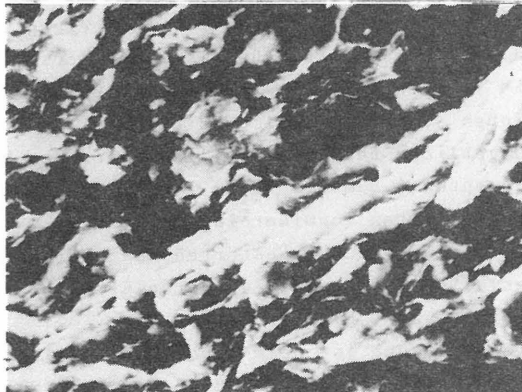


Bild 81c

KREIDE-TON ME
ungestörte Probe
Schnitt durch
Scherzone

10 μm



Eine Aggregatisierung ist nur schwach erkennbar (Bild 81a). Die recht gute Einregelung wird von einer Wellung überdeckt. Das Mikrogefüge kommt der in Bild 3 skizzierten, "turbulent-statischen" Struktur nahe und ist wahrscheinlich postsedimentär durch vorwiegend mechanische Diagenese aus einem in marinem Milieu gebildeten dispers-ausgeflockten Gefüge entstanden.

Nach Aufbereitung und Wiederbelastung stellt sich ein ähnliches Gefüge trotz sehr viel geringerer Kompaktion ein (Bild 81b), da bei der Aufbereitung die schwache Aggregatisierung nicht zerstört und ein Primärgefüge nicht eingestellt werden konnte.

Die im ungestörten Zustand für das bodenmechanische Verhalten maßgeblichen Strukturelemente sind die deutlich eingeregelterten, im Vergleich zu den anderen Tönen sehr kleinen Einzelminerale und Aggregate.

Der Schnitt durch eine Scherzone (Bild 81c) zeigt eine ca. 10µm breite, durch eine sehr scharfe Abgrenzung zur Umgebung gekennzeichnete Scherfuge. Die Störungen in der Umgebung sind erkennbar, bleiben aber sehr gering. Der Unterkreide-Ton ME bildet also beim Abscheren eine gering ausgedehnte Scherfuge mit einer gut erkennbaren parallelen Einregelung der betroffenen Strukturelemente.

b) RUPEL-TON

Der Rupel-Ton SP besitzt eine durch den hohen Fossiliengehalt gekennzeichnete, dichte und nur schwer zu beurteilende Struktur (Bild 82a). Eine Einregelung ist, da die Tonmineralmatrix kaum erkennbar ist, nur schwer festzustellen (am REM). Strukturelemente sind die Fossilien und Kalkkonkretionen sowie die gleichmäßig verteilten Poren. Geomechanisch maßgebliche Bestandteile sind neben den benannten Strukturelementen (5µm bis 30 µm) die vermutlich durch Karbonate stabilisierten Tonmineralaggregate.

Im Vergleich zum ungestörten Mikrogefüge zeigt das Gefüge der aufbereiteten und wiederbelasteten Proben eine bessere Einregelung (Bild 82b).

Die Scherzone ist beim Rupel-Ton (Bild 82c) breiter als beim Ton ME und bei der hier ausgewählten Probe durch eine

Bild 82a

RUPEL-TON

ungestörte Probe
Vertikalschnitt

10 μm

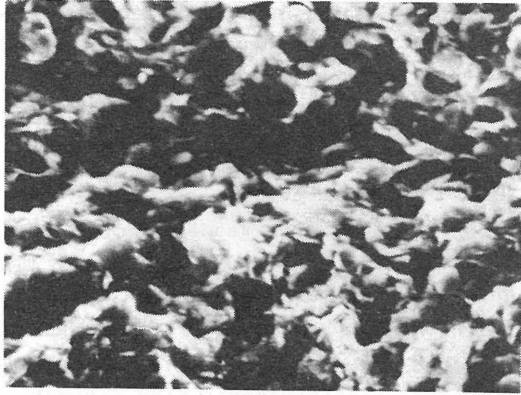


Bild 82b

RUPEL-TON

aufbereitete und
mit 420 kPa wiederbelastete
Probe

10 μm

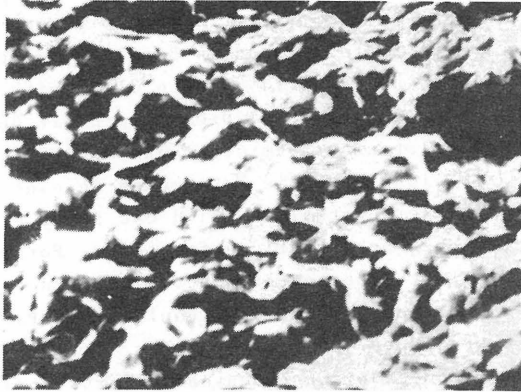
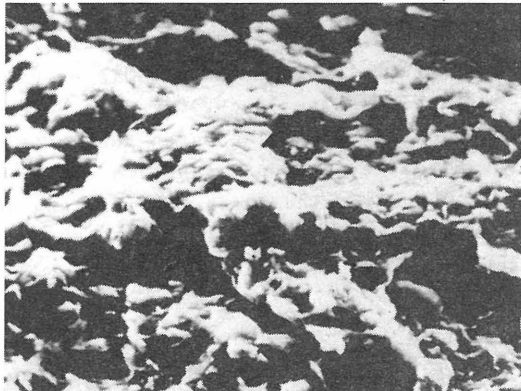


Bild 82c

RUPEL-TON

ungestörte Probe
Schnitt durch
Scherzone

10 μm



zwischen zwei ca. 20µm breiten Auflockerungszonen liegende dichtere Zone mit einer ausgeprägten Parallelorientierung der Tonteilchen gekennzeichnet.

c) MIOZÄN-TONE

Das Mikrogefüge der Miozän-Tone kann wegen nur geringer Unterschiede zwischen den beiden Aufschlüssen gemeinsam beurteilt werden. Es ist gekennzeichnet durch einen sehr hohen Anteil an Grobbestandteilen, die zu einem der in Bild 3 skizzierten "Skelettstruktur" nahekommenden Gefüge führen (Bild 83a,b). Der gut erkennbare Hellglimmer zeigt als einziges Strukturelement eine schwache horizontale Einregelung. In Bild 83a sind Abdrücke von Grobbestandteilen erkennbar, Bild 83b zeigt u.a. einige Quarzkörner. Als typische Bestandteile sind in Bild 84a eingebettete Grobschluffteilchen und in Bild 84b ein Glaukonitkorn (nach Aussiebung) wiedergegeben. Dieses Korn mit dem Durchmesser von 0,2 mm, ist eine Tonmineralneubildung und hat seine Form vermutlich durch die Entstehung in einer der zahlreichen Foraminiferen erhalten. Bild 84c zeigt derartige, in den Miozän-Tonen sehr häufig auftretende Foraminiferen, die im Gefüge fest eingebettet sind. Die auf dem Bild in der Umgebung erkennbaren kleinen Kugelhaufen sind Pyrit- oder Markasitkonkretionen.

Die geomechanisch bedeutsamen Strukturelemente sind hier die zahlreichen Grobbestandteile (Foraminiferen, Glaukonite, Quarze, Fossilien, Konkretionen), die teilweise Neubildungen im Porenraum sind und deshalb zu einer besonders hohen Dichte beigetragen haben. Die enthaltenen Tonminerale (außer Glaukonite) bestimmen das Gefüge nur untergeordnet. Die in den Tonmineralanalysen festgestellten Wechsellagerungsminerale gehören vermutlich nicht zum Primärmineralbestand, sondern sind durch Verwitterung des Hellglimmers entstanden. Die in den REM-Aufnahmen häufig beobachteten "Ausfransungen" der Kanten des Hellglimmers deuten dies an. Die Primärstruktur des Miozän-Tons ist nicht mehr erkennbar. Die beobachtete schwache Einregelung des Hellglimmers, der keine Matrix bildet, ist mechanisch vermutlich unwirksam.

Bild 83a

MIOZÄN-TON KI
ungestörte Probe
Vertikalschnitt

10 μm

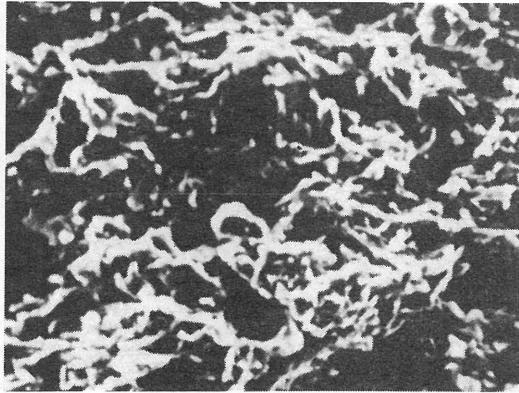


Bild 83b

MIOZÄN-TON HH
ungestörte Probe
Vertikalschnitt

100 μm

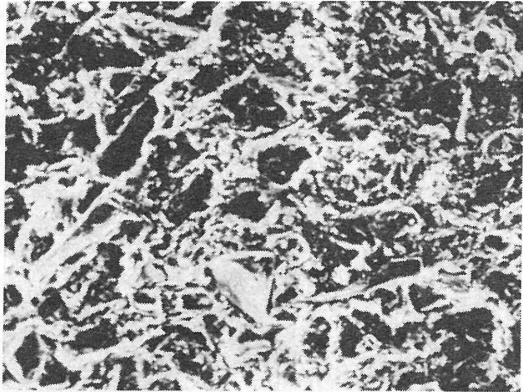


Bild 83c

MIOZÄN-TON KI
aufbereitete und
mit 1,5 MPa wie-
derbelastete
Probe

20 μm

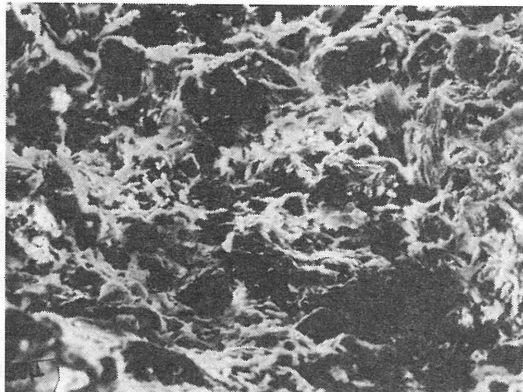


Bild 84a

MIOZÄN-TON HH

ungestörte Probe
Vertikalschnitt

40 μm

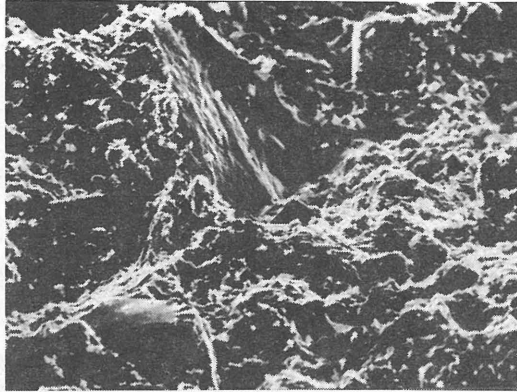


Bild 84b

MIOZÄN-TON HH

Glaukonitkorn
nach Aussiebung

40 μm

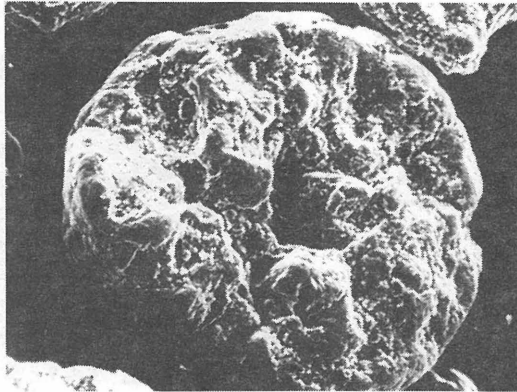
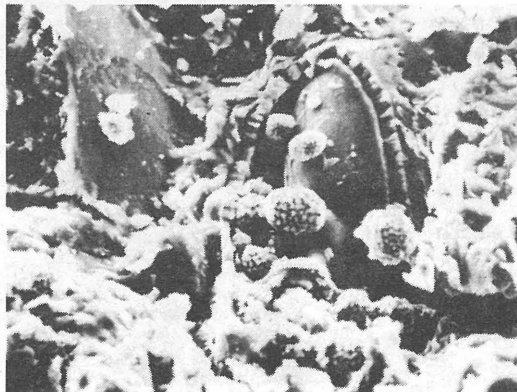


Bild 84c

MIOZÄN-TON HH

ungestörte Probe
Foraminiferen,
Pyrit- bzw. Marka-
sitkonkretionen

10 μm



Nach Aufbereitung und Wiederbelastung ist diese Einregelung nicht wieder herstellbar, sie muß also durch Sedimentation im Primärgefüge und nicht durch mechanische Diagenese entstanden sein (Bild 83c).

Die Untersuchung von Scherfugen erwies sich bei den Miozän-Tonen im REM als sehr schwierig, da wegen der Grobbestandteile größere Bereiche betroffen waren.

d) LAUENBURGER TON

Der Lauenburger Ton ED (Bild 85a) zeigt eine offene, porige, durch eine gut erkennbare Textur gekennzeichnete Struktur. Die Einregelung betrifft vor allem die größeren Strukturelemente (Illite, Kaolinite) und ist etwas schlechter als beim Unterkreide-Ton ME. Aufgrund des Zusammenhanges zwischen Tongehaltsänderung bei Ultraschallbehandlung und gemessenem Kalkgehalt, den fehlenden Quelltendenzen bei ungestörten Proben und der hohen Kohäsion müssen beim Lauenburger Ton sehr feste, diagenetisch entstandene Bindungen, die möglicherweise durch die Brückenwirkung von Ca^{++} -Ionen (positive Ladung) begünstigt sind, erwartet werden. Aus einem wegen der reliefartigen Oberfläche der Probe nur bedingt interpretierbaren Röntgenverteilungsbild (Bild 85b, Ausschnitt entspricht Bild 85a) wird erkennbar, daß das Calcium in der Probe relativ gleichmäßig verteilt ist, aber auch stellenweise gehäuft auftritt. Möglicherweise trägt diese Ca-Verteilung zur mechanischen Verfestigung des Tones bei. Ein genauer Nachweis ist hier nicht möglich.

Geomechanisch bedeutsam sind also neben den offensichtlich sehr festen Kontakten im Gefüge die große Porenzahl mit den damit verbundenen sehr großen Bewegungsfreiheitsgraden der Strukturelemente und die auf die größeren Strukturelemente beschränkte, deutlich erkennbare Einregelung.

Nach Aufbereitung und Wiederbelastung ist eine Einregelung im Gefüge nicht mehr erkennbar.

Die Scherzone (Bild 85c) ist beim Ton ED auf eine Scherfuge von ca. 30 bis 50 μm begrenzt, die Einregelung in diesem Bereich bleibt schlechter als bei den Tonen SP und ME. Ursache dafür ist die geringe Dichte des Tons.

Bild 85a

LAUENBURGER TON ED
ungestörte Probe
Vertikalschnitt

10 μ m

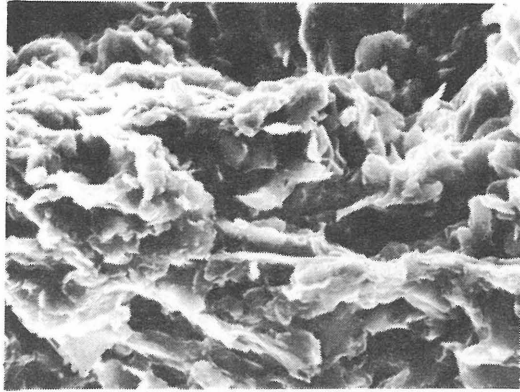


Bild 85b

LAUENBURGER TON ED
Röntgenverteilungs-
bild für Calcium;
Bereich von Bild
85a eingeschlossen

10 μ m

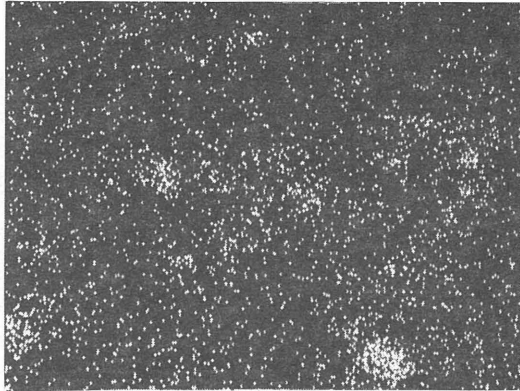
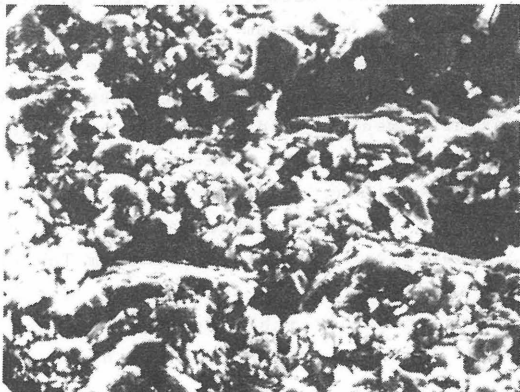


Bild 85c

LAUENBURGER TON ED
ungestörte Probe
Schnitt durch
Scherzone

10 μ m



Die geringe Dichte erlaubt nach Überwindung der Anfangsscherwiderstände, zu denen die erkannten diagenetischen Kontakte im Gefüge gehören, Relativverschiebungen ohne ausgeprägte Einregelungen in der Scherfuge. Diese Interpretation wird durch die hohen E_d -Werte beim Ton ED unterstrichen.

7.3.3 RÖNTGENTEXTURANALYSEN

7.3.3.1 VERSUCHSTECHNIK

Die Untersuchungen wurden an einem Rückstrahl-Röntgentexturgoniometer (RTG), bestehend aus einem Röntgendiffraktometer (Philips PW 1050) und einem Texturanalysator (Philips PW 1078) des geologischen Institutes der Universität Göttingen ausgeführt.

Die Proben wurden ähnlich wie für die REM-Aufnahmen vorbereitet, die Oberflächen jedoch planbearbeitet.

Mit der Versuchseinrichtung können Tonmineraleinregelungen durch Auswertung der "Braggschen Gleichung" (u.a. LIEBER, 1969) über Zusammenhänge zwischen Netzebenenabständen und Reflektionsmaxima bei Röntgenstrahlung identifiziert werden. Dazu werden die Proben nach Auswahl eines zu untersuchenden Minerals und Einstellen dessen Glanzwinkels (mineraltypischer Parameter) systematisch in bestimmten Winkelschritten gedreht und bestrahlt. Gemessen werden über ein Zählrohr die Rückstrahlintensitäten (Bild 86).

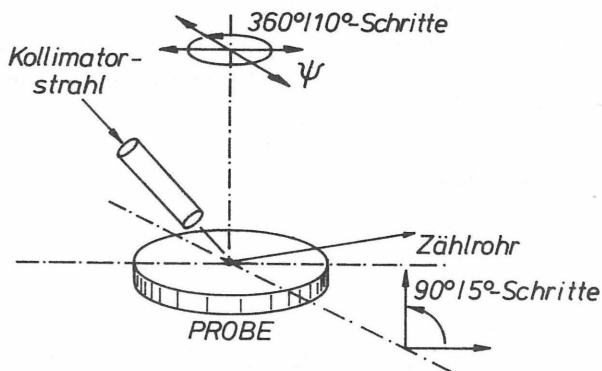


Bild 86: Systemskizze zur Bewegung der Probe und Bestrahlung

Bei einem Kippwinkel der Probe von mehr als 70° trifft der Röntgenstrahl die Probe nicht mehr voll, so daß diese Intensitäten nicht ausgewertet werden können. Durch eine zusätzliche Translationsbewegung der Probe und die spaltförmige Beleuchtung (3×26 mm) wird bei jeder Messung (648 Messungen à 10 Sek., je Probe ca. 7 Std.) ein größerer Bereich erfaßt.

Die Auflösung des RTG reicht bis etwa 1° , so daß fast alle Tonminerale klar voneinander abgegrenzt werden können. Die sehr eng beieinander liegenden Reflexe des Illits (001-Reflex) und des Glimmers können jedoch nicht unterschieden werden.

Beachtet werden muß, daß mit der Texturanalyse jeweils nur die Einregelung eines Minerals untersucht wird, die nicht notwendigerweise repräsentativ für die Gesamteinregelung in dem betreffenden Ton sein muß. Hier wurden deshalb stets zwei Tonminerale untersucht (Illit und Kaolinit).

In der sich an die Messung anschließenden programmierten Vorauswertung werden nach Angaben der Mitarbeiter des Göttinger Institutes (Stand: 1983) nach Durchführung einer Untergrundkorrektur und Wichtung der beim Meßablauf überbewerteten inneren Bereiche die Meßwerte normiert. Diese Vorgehensweise wurde von SCHILLER (1980) anhand von künstlich hergestellten Proben mit statistischer Zufallsverteilung der reflektierenden Komponenten erfolgreich überprüft. Mit der Normierung können auch Proben unterschiedlicher Massenschwächungskoeffizienten und unterschiedlicher Mengenanteile des betreffenden Minerals verglichen werden. Ergebnis der Vorauswertung ist ein bereinigtes Poldiagramm mit einem Zahlenraster aus Intensitätsangaben (siehe dazu SCHILLER, 1980).

7.3.3.2 TEXTURPARAMETER

Aus den erhaltenen Meßdaten wurden Texturdiagramme entwickelt und zunächst auf Axialsymmetrie untersucht (Bild 87). Da alle untersuchten Proben eine eindeutig axialsymmetrische Textur zeigten, konnte aus den Texturdiagrammen jeweils ein Texturprofil als Mittel der 4 Einzelprofile MA, MB, MC und MD ermittelt werden.

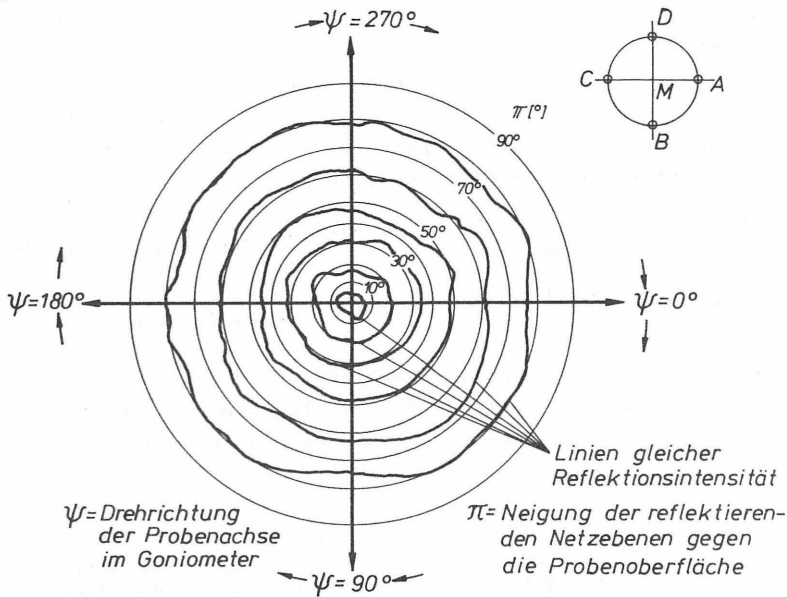


Bild 87: Texturdiagramm mit Linien gleicher Reflektionsintensität

Die horizontale Achse der Texturprofile (Bild 88) ist in Winkelklassen der Weite 5° im Bereich von 0° (horizontal liegende Tonminerale reflektieren) bis 70° (nahezu senkrecht zur Probenoberfläche orientierte Tonminerale reflektieren) eingeteilt. Die Untersuchung von Winkeln oberhalb von 70° ist, wie erwähnt, aus gerätetechnischen Gründen nicht sinnvoll.

In der Literatur werden eine Reihe von verschiedenen Parametern zur Quantifizierung des Einregelungsgrades von Tonmineralen angegeben. So wird beispielsweise das Verhältnis zwischen maximaler und mittlerer Intensität oder ein aus dem Texturprofil bei Annahme einer Normalverteilung der Intensitäten errechenbarer Exzeßwert (Steilheit der Kurve) vorgeschlagen. SCHILLER (1980) verwendet den Winkelwert bei halber Maximalintensität (Halbwertsbreite). Die genannten Parameter werden hier nicht verwendet, da sie die Texturprofile nicht befriedigend erfassen.

Auch der noch am ehesten verwendbare Exzeßwert muß wegen fehlender Normalverteilung der Intensitäten kritisch bewertet werden.

Der hier verwendete Texturparameter T (Einregelungsgrad) wird aus dem mittleren Polwinkel $\bar{\pi}$ der jeweiligen Messung und dem bei vollständig regelloser Anordnung errechenbaren mittleren Polwinkel π^* ermittelt:

$$T = 1 - \frac{\bar{\pi}}{\pi^*}$$

$\bar{\pi}$ = mittlerer Polwinkel der Messung

π^* = mittlerer Polwinkel bei regelloser Anordnung

Bei vollkommener Einregelung parallel zur Oberfläche beträgt der mittlere Polwinkel $\bar{\pi} = 0^\circ$, der Texturparameter erhält dann den Wert 1,0, bei regelloser Anordnung wird $T = 0$ (Bild 88).

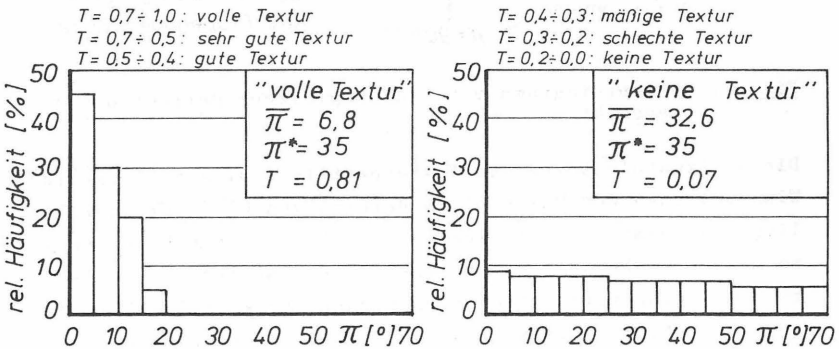


Bild 88: Texturbeispiele

7.3.3.3 ERGEBNISSE UND BEWERTUNG

Untersucht wurden die Tone ME, SP, KI und ED. Die Beurteilung der Texturdiagramme ergab bei allen Proben eine rotationssymmetrische Struktur (Beispiele: Bild 89). Die aus den Texturdiagrammen abgeleiteten Texturprofile zeigten, daß die Rückstrahlintensitäten über dem Winkel π nicht normalverteilt sind.

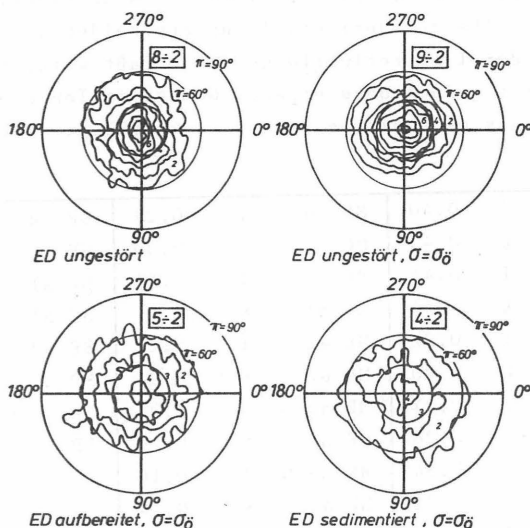


Bild 89: Texturdiagramme, Beispiel Lauenburger Ton ED, teilweise nach Belastung im Ödometer

Die errechneten Texturparameter T (Bilder 90 und 91) zeigen, daß der Lauenburger Ton im ungestörten Zustand die beste Einregelung aufweist, gefolgt vom Kreide-Ton und vom Rupel-Ton.

Der hohe Texturwert des Lauenburger Tons wird durch die REM-Aufnahmen jedoch relativiert. Dort zeigte der Ton eine bevorzugte Einregelung der größeren Strukturelemente, die nicht notwendigerweise für das mechanische Verhalten in allen Spannungsbereichen ausschlaggebend sein muß. Der Unterkreide-Ton ME hingegen zeigte in den REM-Aufnahmen eine von einer Wellung überdeckte, bessere Einregelung, die von der Texturanalyse nicht voll erfaßt wird.

Auch der Miozän-Ton KI, bei dem eine Einregelung aufgrund des Gefügeinventars, der lichtmikroskopischen Beurteilung und der REM-Aufnahmen nicht erwartet wurde, besitzt mit $T = 0,25$ einen ähnlich hohen Texturparameter wie die Tone ME und SP. Dieses Ergebnis kommt jedoch nicht durch die eine tatsächlich in den Miozän-Tonen vorhandene allgemeine

Einregelung zustande, sondern durch die weitgehend horizontale Lage des Hellglimmers, dessen Glanzwinkel sich von dem des Illits nur geringfügig unterscheidet und der deshalb bei den Illitreflektionen mit erfaßt wird. Der Hellglimmer ist jedoch ohne eigenes Gefüge im Ton eingelagert und wird das mechanische Verhalten kaum beeinflussen.

ED u	I	0.40	ME u	I	0.29	SP u	I	0.28
ED u	K	0.43	ME u	K	0.30	SP u	K	0.25
ED u3	I	0.44	ME a1	I	0.21	SP a1	I	0.24
ED u3	K	0.44	ME a1	K	0.21	SP a1	K	0.26
ED a1	I	0.22	ME a2	I	0.27	SP a2	I	0.34
ED a1	K	0.20	ME a2	K	0.27	SP a2	K	0.34
ED a2	I	0.27	ME a3 0	I	0.27	SP a3 0	I	0.39
ED a2	K	0.26	ME a3 0	K	0.29	SP a3 0	K	0.41
ED a3 0	I	0.34	ME a3 9	I	0.16			
ED a3 0	K	0.32	ME a3 9	K	0.24			
ED a3 9	I	0.27	ME s1	I	0.30			
ED a3 9	K	0.22	ME s1	K	0.27			
ED s1	I	0.23	ME s2	I	0.31			
ED s1	K	0.20	ME s2	K	0.26	KI u	I	0.25
ED s2	I	0.26				HH u	I	0.21
ED s2	K	0.20				HH a3 0	I	0.12

u: ungestört

a: aufbereitet

s: sedimentiert

1: $\sigma = 0.13 \text{ MPa}$

2: $\sigma = \sigma_{\text{öv}}$

3: $\sigma = 3.0 \text{ MPa}$

0/9: $\beta = 0^\circ/90^\circ$

K: Kaolinit

I: Illit

Bild 90: Texturparameter T der ungestörten und behandelten Proben

Eine weitergehende Untersuchung der Miozän-Tone erschien deshalb nicht sinnvoll, so daß nur die Zustände "u" und "a3" (Bild 91) beim Ton HH noch untersucht wurden.

Die Untersuchung der aufbereiteten und wiederbelasteten Proben zeigt, daß der Einregelungsgrad beim Rupel-Ton stark, beim Lauenburger Ton schwächer und beim Unterkreide-Ton nur geringfügig mit der Belastung wächst.

Beim Rupel-Ton wird eine bessere Einregelung, beim Unterkreide-Ton eine etwa gleich gute Einregelung wie im ungestörten Zustand durch die Belastung von 3 MPa erreicht.

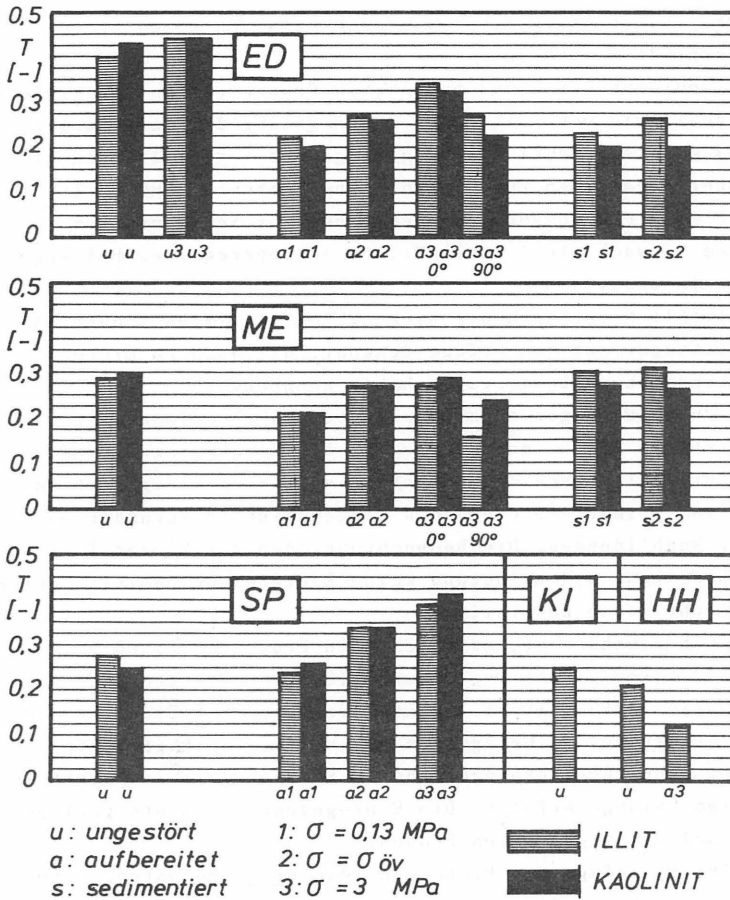


Bild 91: Texturparameter T, Vergleich verschiedener Probenzustände

Beim Lauenburger Ton bleibt die Einregelung nach Aufbereitung und Wiederbelastung deutlich unter dem natürlichen Einregelungsgrad (Bild 91).

Diese Beobachtungen bestätigen die bereits bei Auswertung der REM-Aufnahmen getroffene Aussage, daß das Gefüge des Lauenburger Tons im ungestörten Zustand durch die relativ festen Verknüpfungen bestimmt wird. Diese Bindungen, die die gute Textur des Tons erhalten haben, sind nach der Aufbereitung

größtenteils zerstört, die Wiederbelastung mit Drücken bis 3 MPa reicht zur Herstellung eines ähnlich hohen Einregelungsgrades nicht aus.

Die sedimentierten und belasteten Proben zeigen die gleiche Tendenz. Die hohe natürliche Einregelung des Lauenburger Tons kann sehr viel höhere geologische Vorbelastungen als bisher angenommen zur Ursache haben. Ebenso denkbar ist jedoch auch ein besser als hier (bei der Sedimentation in einem schwach alkalischen Milieu) eingeregelter Primärgefüge in-situ.

Schließlich ist auch die Wirkung von glazialen Schubbeanspruchungen auf das Gefüge denkbar, die auch zu Einregelungsverbesserungen beigetragen haben könnten.

Die Untersuchungen an aufbereitetem oder sedimentiertem und belastetem Ton zeigen insgesamt, daß die Einregelung der ungestörten Tone von der Belastung sehr viel weniger abhängt als vom Primärgefüge und den diagenetischen Veränderungen oder Neubildungen. Die Beobachtung, daß der Miozän-Ton nach Aufbereitung und Belastung keine Einregelung besitzt, unterstreicht diese Beurteilung.

Die Untersuchung von aufbereiteten Proben (ME, ED), die nach der Konsolidierung unter 0,13 MPa um 90° gedreht und dann bis 3 MPa weiterbelastet wurden, zeigt (Bild 91), daß die Anpassung des Gefüges an den neuen, durch gedrehte Hauptspannungen gekennzeichneten Spannungszustand nicht in vollem Umfange erfolgt. Die Einregelung ist stets geringer als bei nicht gedrehten Proben.

Das Primärgefüge der Proben und die erste Belastung nehmen also maßgeblich Einfluß auf das Gefüge, auch wenn, wie hier, neue, um den Faktor 23 höhere Belastungen hinzutreten.

Belastungen, die nach der Primärbelastung folgen, hinterlassen offensichtlich sehr viel geringere messbare Spuren im Gefüge, so daß der qualitativen und besonders der quantitativen Erkennung sekundärer Belastungen im Mikrogefüge Grenzen gesetzt sind.

7.4 FELDUNTERSUCHUNGEN

In den 4 Tonen WO, ME, AN und HH konnten Pressiometerversuche ausgeführt werden.

7.4.1 GERÄTE UND METHODE

Eingesetzt wurde eine Standard-Sonde der Fa. MENARD mit einem Außendurchmesser von 60 mm, einer Höhe von 216 mm (nur Meßstrecke) und einem Volumen von 800 ml. Gerät und Sondierverfahren sind bei MARSLAND & RANDOLPH (1977) ausführlich beschrieben.

Zwischen Erbohren der Meßstrecke und Sondiervorgang lagen bei den Sondierungen in den Kreideformationen max. 50 Min., bei den Sondierungen im Miozän-Ton HH max. 2 Std.. Die Minimierung der Wartezeit zwischen Bohren und Sondieren ist ausschlaggebend für die Güte der Meßergebnisse. Auf ein durchgängiges Erbohren der Meßstrecke, das aus bohrtechnischen Gründen (Wartezeiten etc.) wünschenswert war, wurde deshalb verzichtet.

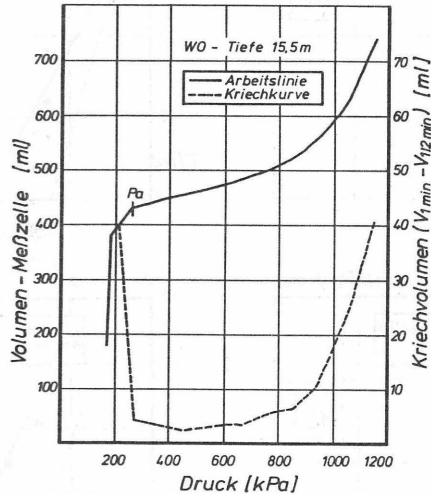


Bild 92: Pressiometerkurve, Beispiel Kreide-Ton WO, Tiefe 12,5 m

Die Druck-Volumen-Kurven von Pressiometerversuchen zeigen insbesondere in überkonsolidierten Böden häufig einen ausgeprägt linearen Bereich, dessen Beginn (Druck p_a) als totale Horizontalspannung im Boden interpretiert werden kann. MARSLAND & RANDOLPH (1977) haben für "London Clay"

gezeigt, daß die tatsächlichen Horizontalspannungen dort noch höher als die p_a -Werte liegen und geben ein Verfahren zur verbesserten Ableitung aus den Versuchen an. Da dieses Verfahren eine zuverlässige Ermittlung der undrainierten Scherfestigkeit c_u mit dem gleichen Versuch voraussetzt, die aber häufig nicht gelingt und zudem eine Reihe von Annahmen enthält, die nicht hinreichend abgesichert erscheinen, werden im vorliegenden Falle Horizontalspannungen aus den p_a -Werten, also eher zu niedrig, geschätzt.

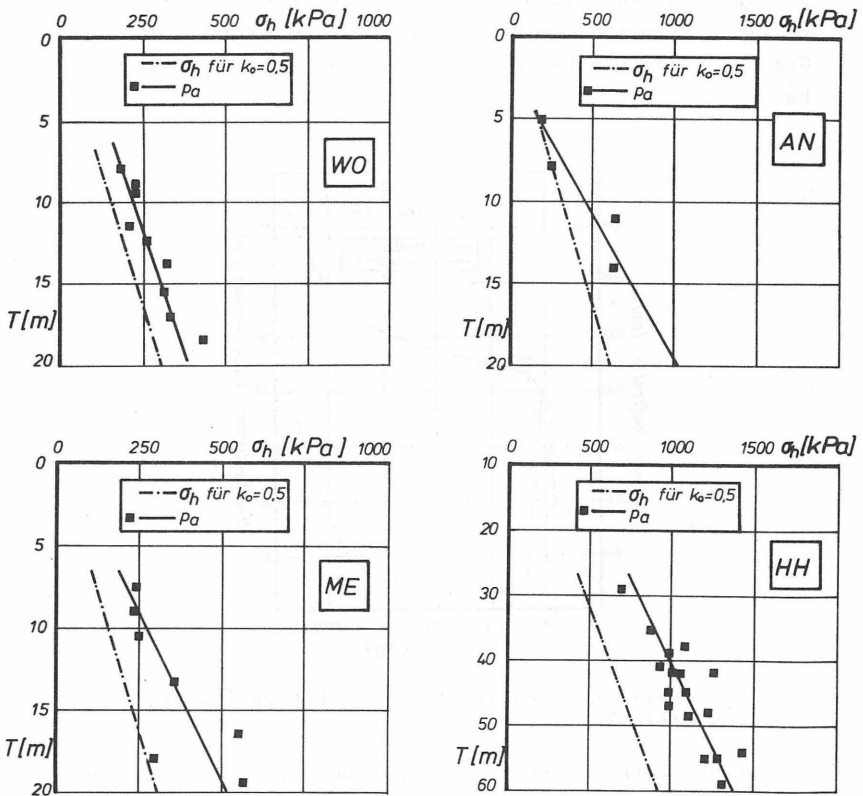


Bild 93: Horizontalspannungen p_a aus Pressiometerversuchen

7.4.2 ERGEBNISSE UND BEWERTUNG

Die gemessenen p_a -Werte (Bild 93) sind hier durchweg höher als die für einen Erdruchdruckbeiwert von $K_0 = 0,5$ abschätzbaren totalen Horizontalspannungen. K_0 -Werte können jedoch wegen der teilweise nicht genau bekannten Grundwasserstände und den Unsicherheiten bei den Wichten der aufliegenden Schichten nicht angegeben werden. Sie liegen aber in allen Fällen mit Sicherheit über 1,0, teilweise auch über 1,5.

Geräteeffekte konnten mit Kontrollversuchen in normalkonsolidierten Böden ausgeschlossen werden.

In allen 4 untersuchten Tonen herrscht also offensichtlich ein Eigenspannungszustand, der durch eine Drehung der Hauptspannungsachsen um 90° ($\sigma'_h > \sigma'_v$) gekennzeichnet ist. Über ähnliche Ergebnisse berichten eine Reihe von Autoren, u.a. MARSLAND & RANDOLPH (1977), SIMPSON et al (1979). Die Charakteristik der Eigenspannungszustände der Tone wurde bereits bei der Festlegung des K-Wertes für die Triaxialversuche berücksichtigt und wird bei der weiteren Interpretation der Ergebnisse beachtet.

8. DEUTUNG BODENMECHANISCHER VERSUCHSERGEBNISSE MIT INGENIEURGEOLOGISCHEN PARAMETERN

8.1 BODENPHYSIKALISCHE KENNWERTE

Die wesentlichen Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen sind in Punkt 4.6 unter B-1 bis B-5 zusammengefaßt.

Die Normalverteilung der Korngrößen der Tone ME, SP und ED ist für Sedimente typisch (B-1). Die auffällige Teilung der Korngrößen der Miozän-Tone HH und KI kommt durch die Glaukonit-Mineraie, den hohen Feinsandanteil und die anderen Neubildungen und Aggregatisierungen im Ton zustande. Die Glaukonitkörner erreichen Größen bis 0,2 mm. Über die Festigkeit dieser ungewöhnlich großen Tonteilchen liegen keine Angaben vor. Die Versuche mit langer Wasserlagerung im Rahmen der Klassifikation haben jedoch ebenso wie die Versuche mit Ultraschallbehandlung gezeigt, daß bei einer

Wechselwirkung mit Wasser und Dispergierenergie Teilchen auch in diesem Ton, möglicherweise die Glaukonitkörner, in kleinere Einheiten zerfallen.

Die unter B-1 angegebene, mit Ultraschallbehandlung erreichte Messung eines höheren Tonanteiles gegenüber der üblichen Aufbereitung kann mit der Zerstörung fester Kontakte zwischen Tonteilchen oder in Aggregaten erklärt werden.

Gerade beim Lauenburger Ton bestehen derartige Bindungen, wie die trotz geringer Dichte sehr hohen Kohäsionswerte bei gleichzeitig niedrigen Reibungswinkeln, die fehlenden Quellendenzen und der Ultraschalleffekt zeigen.

Der gute Zusammenhang zwischen Kalkgehalt und Tonanteiländerung durch Ultraschallbehandlung (B-1, B-5) bei Kalkgehalten unter 10% legt die Vermutung nahe, daß die Bindungen durch die Wirkung von Ca^{++} -Ionen unterstützt werden.

Die Tone mit hohen Kalkgehalten (AN, SP) lassen sich in den angegebenen Zusammenhang (Bild 30) nicht einordnen.

Eine Ursache kann nicht angegeben werden, möglicherweise liegt der Kalk bei diesen Tönen in einer anderen Form vor.

Die hohe Aktivitätszahl des Unterkreide-Tons ME (B-4) kommt durch den hohen Anteil an Wechsellagerungsmineralen zustande. Die Aktivitätszahlen der Tone HH, KI, ED und QU liegen um 1,0, ein Bereich, in dem weitere Differenzierungen aufgrund der schwierigen Bestimmung dieses Kennwertes nicht sinnvoll sind. Überraschend ist jedoch die im Vergleich zum Unterkreide-Ton geringe Aktivitätszahl des Lauenburger Tons trotz enthaltener Smektite und Wechsellagerungsminerale.

Der nachgewiesene Einfluß von Dispergierenergie und -zeit auf maßgebliche Klassifikationsparameter muß in der bodenmechanischen Praxis stärker berücksichtigt werden.

So kann ein Ton bei üblicher Klassifikation im Hinblick auf ein Bauvorhaben, bei dem eine Entlastung und ein verstärkter Wasserzutritt vorkommen, zu günstig eingeschätzt werden.

Andererseits kann ein Ton bei einem Bauvorhaben, bei dem nur eine zusätzliche Belastung eintritt, durch Klassifikation mit höherer als nach Norm üblicher Dispergierenergie und -zeit zu ungünstig eingeschätzt werden, da er sich infolge des Bauvorhabens nicht in der Weise verändert, wie es die aufwendige Dispergierung in der Klassifikation simuliert.

8.2 ZUSAMMENDRÜCKUNGS- UND QUELLVERHALTEN

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Zusammendrückungs- und Quellverhalten sind unter Punkt 5.3 (Z-1 bis z-7) für die Ödometerversuche und unter Punkt 6.5 (T-1 bis T-4) für die Triaxialversuche zusammengefaßt.

8.2.1 VORBELASTUNGEN UND ÄQUIVALENTE SPANNUNGEN

Die geostatistischen Auflastspannungen, die die bei den Tönen zur Zeit messbare Porenzahl erzeugt haben, sind bei allen Tönen höher als die aus den Ödometerversuchen zu ermittelnden Vorbelastungsspannungen (Z-1). Diese Beurteilung, die sich auch aus den Betrachtungen der äquivalenten Spannungen ergeben hat, gilt uneingeschränkt für die Tone ME und ED, da bei diesen Tönen Porenzahländerungen durch andere Wirkungen als Druck nicht erkennbar sind. Bei den Miozän-Tönen und teilweise auch beim Rupel-Ton ist die aktuelle Porenzahl nicht nur durch mechanische Diagenese (Druck), sondern auch durch chemische, diagenetische Wirkungen wie die Glaukonitneubildung (Miozän-Tone) und die Karbonatkonkretionen im Porenraum (Rupel-Ton) zustande gekommen. Eine Trennung der verschiedenen diagenetischen Wirkungen ist nicht möglich. Die im Ödometer ermittelten Vorbelastungen sind deshalb nicht notwendigerweise äquivalente Spannungen im Sinne der unter Punkt 2.2.1 vorgenommenen Definition, sie zeigen jedoch die Spannung an, bei der das Zusammendrückungsverhalten der Tone eine signifikante Änderung erfährt. Diese Änderung kann neben der Überschreitung der tatsächlichen äquivalenten Spannung auch die Überschreitung der von neugebildeten diagenetischen Kontakten im Gefüge aufnehmbaren Druckspannung zur Ursache haben. Der Ödometerversuch ist für die Unterscheidung dieser Ursachen nicht geeignet. Die im Ödometerversuch bestimmte Spannung σ'_{ov} wird demnach oft falsch interpretiert, aber letztlich im tendenziell richtigen Sinne verwendet. Die Versuche an aufbereitetem und an resedimentiertem Material mit den dabei festgestellten sehr großen Unterschieden zwischen den rückgerechneten äquivalenten Spannungen unterstreichen die Feststellung, daß nur ungestörte Proben untersucht werden dürfen und daß der Versuch, die Spannungs-

geschichte im Versuch an gestörten Proben nachzufahren, das Risiko für sehr große Fehleinschätzungen beinhaltet. Die Ergebnisse zeigen außerdem, daß der Versuch, die geologische Vorbelastung aus Ödometerversuchen zu bestimmen, wenig Aussicht auf Erfolg hat. BERNHARD (1962) hat dies für norddeutsche Tone getan, hat aber zu recht die diagenetisch verfestigten Tone (z.B. Kreide-Tone) ausgeklammert. Fehlerquellen bei der Schätzung der geologischen Auflast aus dem Versuch sind:

- Alterungskriechen (Bild 4)
- Quellvorgänge, Entspannungsdehnungen
- Diagenetische Verfestigungen, Kontaktausbildungen und -verstärkungen, Neubildungen, Änderungen und Rückbildungen
- Zeitpunkt der diagenetischen Veränderungen (Einfrieren eines Dehnungszustandes)
- Änderung des Dehnungszustandes durch zusätzliche Schubbeanspruchung

Die Untersuchung von senkrecht zur Schichtung (hier: horizontal) entnommenen Proben kann zur Abschätzung einer Vorbelastung ebenfalls nicht herangezogen werden, da mit diesen Versuchen hauptsächlich die strukturbedingte Anisotropie erfaßt wird und nicht notwendigerweise eine ehemalige, in horizontaler Richtung wirksame und aufgrund fehlender Entspannungsmöglichkeiten erhaltene Vorbelastungsspannung.

Die Zusammendrückbarkeit von horizontal eingeregelter Töne ist in senkrechter Richtung eher möglich (Bild 94a,c), da in diesem Fall vorwiegend die Abstände von Teilchenflächen gegen die Abstoßung von Doppelhüllen durch Auspressen von physikalisch freiem oder nur schwach gebundenen Wasser verringert werden müssen. Bei horizontaler Belastung hingegen (Bild 94b,d) sind zur Zusammendrückung Relativverschiebungen von Teilchen erforderlich, die stark behindert sind und Umorientierungen im Gefüge erfordern. Die dafür erforderlichen Freiheitsgrade sind bei geringer Dichte (Bild 94a,b), wie sie der Lauenburger Ton z.B. aufweist, eher vorhanden, so daß bei dichten Tönen auch bei geringer Einregelung eine größere Anisotropie auftreten kann (z.B. ME, SP). Die bei aufbereiteten und wiederbelasteten Proben in horizontaler Richtung gemessenen, gegenüber der vertikalen Richtung kleineren Vorbelastungen ($\sigma_{\text{öh}} < \sigma_{\text{öv}}$) trotz auch dort

vorhandener, schwacher Einregelung zeigen allerdings, daß nicht nur die Textur, sondern auch der letzte Spannungszustand auf die im Ödometer messbaren Vorbelastungsspannungen Einfluß nimmt.

Auch die Pressiometerversuche bestätigen diese Beurteilung. Dort wurden bei den betroffenen Tönen stets höhere Horizontalspannungen p_a gemessen, als aus der Vertikalspannung und einem K_o -Wert von 0,5 errechenbar sind, so daß nach den Versuchen von einer höheren horizontalen Vorspannung in den Tönen auszugehen ist.

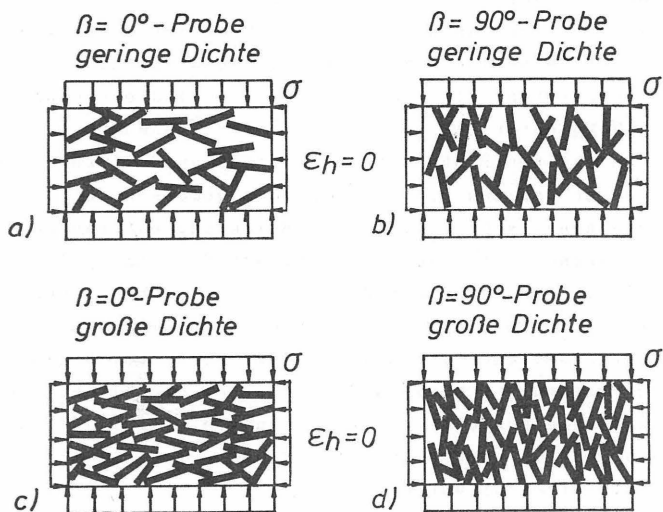


Bild 94: Prinzipskizze zur richtungsabhängigen Zusammen-drückbarkeit bei Strukturanisotropie

Die Tone speichern also auch Spannungszustände, ohne daß dies an der Porenzahl oder am Mikrogefüge messbar ist. Das liegt zum einen sicher an den verfügbaren Meßmethoden, zum anderen aber auch daran, daß die verbliebene horizontale Vorspannung in den Kontakten der Strukturelemente wegen fehlender Dehnungsmöglichkeiten weitgehend elastisch gespeichert und deshalb im Gefüge nicht erkennbar ist. Das von den anderen Tönen abweichende Verhalten des Miozän-Tons KI unterstreicht diese Interpretation.

8.2.2 ZUSAMMENDRÜCKBARKEIT

Die untersuchten Tone sind mit Ausnahme des Tones KI in horizontaler Richtung zunächst sehr viel weniger zusammen-drückbar als in vertikaler Richtung (Bild 38, Z-4). Der betreffende Anisotropieparameter α_{k2} nähert sich erst bei großen Spannungen einem Grenzwert um 1. Dieses Verhalten ist auf die horizontale Einregelung der Tone bei geringen Freiheitsgraden zu Gefügeänderungen zurückzuführen (siehe Bild 94). Erst bei größeren Spannungen kommt es zu einer Annäherung der Steifigkeiten beider Richtungen, die nur durch Gefügeänderungen möglich ist.

Die Texturanalysen an aufbereitetem Material bestätigen dieses mikromechanische Verhalten grundsätzlich. Auch bei den aufbereiteten, mit $\sigma = 130 \text{ kPa}$ konsolidierten und dann nach Drehung unter $\beta = 90^\circ$ bis zu einer Spannung von 3 MPa weiter belasteten Proben wurden signifikante Einregelungen parallel zur letzten Probenoberfläche gemessen, die nur durch die neue, sehr viel höhere Belastung entstanden sind. Diese Versuche zeigen jedoch auch, daß die Einregelung nicht allein ausschlaggebend für die unterschiedlichen Steifigkeiten der Tone in den 2 Raumrichtungen ist (Z-6). Trotz geringem, aber vorhandenen Texturgrad bei Beginn der zweiten Belastung (0 bis 3 MPa) wurden hier in horizontaler Richtung zunächst höhere Dehnungen erzielt (Bild 37), ehe dann wie bei den ungestörten Proben ein Grenzwert für α_{k2} um 1,0 erreicht wurde.

Durch die sehr hohen Porenzahlen sind bei den gestörten Proben die Freiheitsgrade für Gefügeänderungen so groß, daß die um den Faktor $K_0 = 0,5$ geringere horizontale Konsolidierungsspannung während der ödometrischen Erstbelastung und damit die geringere Vorbelastung in horizontaler Richtung das Zusammendrückungsverhalten bestimmt und den Einfluß der Einregelung überdeckt.

Die gestaltliche Anisotropie in Tonen wird also nur dann mechanisch bedeutsam, wenn die Freiheitsgrade für Umlagerungen der maßgeblichen Strukturelemente durch eine hohe Dichte beschränkt sind.

Die Zusammendrückbarkeit der ungestörten Proben in der

Konsolidationsphase der Triaxialversuche wurde bei einem geringfügig anisotropen Spannungszustand ($K_0 = 1,2$) bei Spannungen bis $p = 0,45$ MPa, also unter geringeren Spannungen als im Ödometer (bis 3 MPa), untersucht.

Die beobachteten Besonderheiten sind unter Punkt 6.5 (T-2 bis T-4) zusammengefaßt.

Die Linearität des Dehnungsverhaltens der Tone (T-2) ist darauf zurückzuführen, daß die verwendeten Konsolidationsdrücke lediglich Wiederbelastungen unter einem beinahe isotropen Spannungszustand darstellen.

Gefügeänderungen sind deshalb nicht zu erwarten. Die auftretenden Dehnungen sind vorwiegend auf Änderungen der Teilchenabstände zurückzuführen.

Die ausgeprägte Anisotropie, die von den Verhältnisswerten ϵ_r/ϵ_a (Bild 49, T-3) angezeigt wird, hat die gleichen Ursachen wie die bei den Ödometerversuchen an ungestörten Proben im unteren Spannungsbereich beobachteten hohen Steifigkeiten in horizontaler Richtung (Bild 38).

Die Tone reagieren auf die Belastung trotz $\sigma_r = 1,2\sigma_a$ mit geringerer horizontaler Zusammendrückung (Bild 49), da die horizontale Einregelung der Strukturelemente und die nicht im Gefüge erkennbare, aber vorhandene höhere horizontale Vorspannung horizontale Dehnungen behindern.

Die bereits mehrfach als gestaltlich am wenigsten anisotrop erkannten Miozän-Tone bestätigen diese Beurteilung mit den auch hier geringsten Unterschieden zwischen axialer und radialer Dehnung. Der Miozän-Ton KI reagiert entsprechend der im Aufschluß (Bild 21) möglichen, vorwiegend horizontalen Entspannung folgerichtig mit einer größeren radialen als axialen Zusammendrückung.

8.2.3 QUELLVERHALTEN

Die unter Z-4 und T-1 zusammengefaßten Beobachtungen zum Quellverhalten der Tone können mit den Mineralanalysen und den Texturanalysen interpretiert werden.

Quelldrücke oder Quelldehnungen entstehen durch das Bestreben von Tonmineralen, ihren gegenseitigen Abstand durch Zwischenlagerung von Wassermolekülen zu vergrößern (siehe Punkt 2.1). Bei ausreichendem Wasserangebot entsteht dabei

ein neues Gleichgewicht zwischen äußeren Druckkräften und inneren anziehenden und abstoßenden Kräften.

Eine vorwiegend horizontale Einregelung der Tonminerale und damit auch der bei Wasserzutritt aufweitbaren Doppelhüllen auf den Flächen der Teilchen (Bild 2) führt zu vorwiegend vertikalen Quelldehnungen oder Quelldrücken. Quellfähige Tonminerale sind im Unterkreide-Ton ME, der die größten Quelldehnungen und Quelldrücke aufweist, die Wechsellagerungsminerale. Beim Rupel-Ton SP sind als quellfähige Minerale Smektiten und Wechsellagerungsminerale enthalten. Der Lauenburger Ton ED, der ebenfalls mit einem hohen Gehalt an Wechsellagerungsmineralen und Smektiten Quellverhalten erwarten ließ, zeigt dies nur bei Entlastung im Ödometer von 3 MPa auf 0 MPa mit einem Schwellbeiwert, der beinahe gleich hoch ist wie bei den Tönen ME und SP (Bild 34). Daß der Lauenburger Ton im ungestörten Zustand keine Quell Tendenzen zeigt, wurde wegen der sehr hohen Porenzahl zunächst auf ein möglicherweise durch die Oberflächennähe eingetretenes vollständiges Ausquellen zurückgeführt. Diese Erklärung konnte jedoch angesichts der hohen Kohäsion und der hohen Steifigkeiten bei beginnender Scherbelastung nicht befriedigen. Eine weitere Ursache muß deshalb darin gesehen werden, daß beim Lauenburger Ton dem Quellvorgang die vermutlich sehr festen Bindungen der Strukturelemente, die die entstehenden Quelldrücke über Zugspannungen aufnehmen, entgegenstehen. Damit ist dann auch geklärt, warum bei Entlastung von großen Drücken im Ödometerversuch (3 MPa) Quellen beobachtet wird: Dort sind die Bindungen der Strukturelemente durch Überschreiten des dafür erforderlichen Druckes (vermutlich: σ'_{ov}) bei der Belastung bereits zerstört worden.

Die geringen Quelldrücke des Miozän-Tons HH sind auf den geringen Gehalt an Wechsellagerungsmineralen (Bild 79) und die beim Ton KI fehlenden Quell Tendenzen auf die zusätzlich gegebene Oberflächennähe zurückzuführen.

Die Anisotropie im Quellverhalten der Tone korrespondiert qualitativ mit ihrer Einregelung.

Die absolute Höhe der Quelldrücke konnte bei den Tönen ME und SP im Triaxialversuch aus den beschriebenen Gründen

(Punkt 6.3.1) genauer gemessen werden. Der Unterkreide-Ton ME zeigt den höchsten Wert mit $P_Q = 300 \text{ kPa}$ (Bild 47). Zusammenfassend ist festzuhalten, daß das Quellverhalten überkonsolidierter Tone nicht nur vom Mineralbestand und den äußeren Spannungen, sondern auch erheblich von der Wirkung diagenetisch entstandener oder verstärkter Bindungen im Gefüge und von der Einregelung der Strukturelemente abhängt. Horizontal eingeregelte Tone quellen vorwiegend in vertikaler Richtung.

8.3 VERHALTEN BEI UNDRAINIERTER SCHERBEANSPRUCHUNG

Die wesentlichen, beim Abscheren der Tone erhaltenen Ergebnisse sind unter Punkt 6.5 (T-5 bis T-12) zusammengefaßt.

8.3.1 SPANNUNGSPFADE UND PORENWASSERDRUCKVERHALTEN

Die Charakteristik der Spannungspfade wird von den in den Proben auftretenden Porenwasserdruckänderungen und damit von der Tendenz der Tone zu kontraktantem oder dilatanten Verhalten unter der jeweiligen Belastung bestimmt. Bei Kompressionsbelastung, also axialer Stauchung (Bild 42), werden die Proben bei dem eingestellten Konsolidationsspannungszustand mit $q_c < 0$ zunächst bezüglich der Schubspannung entlastet (bis $q = 0$) und dann mit positiv wachsendem Deviator bis zum Bruch belastet. Die Neigung aller Tone zu kontraktantem Verhalten bei Belastungsbeginn kann deshalb auf die abnehmende Schubspannung in dieser Phase zurückgeführt werden. Die Tone zeigen jedoch auch bei Deviatorbeträgen, die absolut größer sind als q_c , noch kontraktantes Verhalten. Diese Beobachtung kann, soweit nicht ohnehin nur kontraktantes Verhalten aufgrund geringer Dichte (Lauenburger Ton ED) auftritt, mit der bei axialer Stauchung und dazu senkrechter Einregelung zunächst noch möglichen vertikalen Zusammendrückbarkeit erklärt werden. Diese führt bei verhinderter Volumendehnung zu den beobachteten Porenwasserdruckzunahmen. Folgerichtig sind die Porenwasserdruckzunahmen in der Anfangsphase bei den weitgehend isotropen Miozän-Tonen am geringsten, bei den Tönen ME und SP mit geringer Dichte und

guter Einregelung höher (Bild 62). Der Lauenburger Ton ED besitzt die größte Tendenz zu kontraktantem Verhalten, die durch die geringe Dichte und die gute Einregelung senkrecht zur Kompressionsachse zustande kommt.

Mit zunehmender axialer Stauchung werden nach der kontraktanten Anfangsphase dann Gefügeänderungen im Bereich der Scherzone erforderlich, die aus den beiden Anteilen "Auflockerung" und "Umorientierung von Strukturelementen" bestehen. Bei den Tönen ME und SP sind Auflockerungen und Umorientierungen im Gefüge zur Ausbildung einer Scherzone erforderlich, wie die REM-Aufnahmen zeigen. Bei den Miozän-Tönen werden wegen des Gefügeinventars vorwiegend Auflockerungen und Rotationen von Strukturelementen auftreten.

Beim Lauenburger Ton entfällt aufgrund der geringen Dichte der Anteil "Auflockerung" wie auch die REM-Aufnahmen gezeigt haben (Beispiel: Bild 85c).

Die im Grenzzustand gemessenen Porenwasserdruckänderungen, gekennzeichnet durch den Parameter a_f , zeigen durch die signifikante Korrelation mit der Porenzahl e (Bild 65), daß nach Erreichen des Grenzzustandes alle anderen Einflüsse gegenüber der Dichte zurücktreten.

Bei Extensionsbelastung (axialer Dehnung) zeigen alle Tone mit Ausnahme des Tons KI (einige Teilversuche) von Belastungsbeginn an eine Tendenz zu dilatantem Verhalten, die bei den Miozän-Tönen am größten und beim Lauenburger Ton am geringsten ist.

Das Fehlen der bei Kompression beobachteten Tendenz zu kontraktantem Verhalten bei Belastungsbeginn ist auf die bei Extension von $q_c < 0$ weiter negativ zunehmende deviatorische Beanspruchung zurückzuführen. Hinzu tritt der Einfluß der Einregelung. Die bei Extension auftretenden Dehnungen erfordern größere Umorientierungen im Gefüge, die sofort beginnen, da hier die deviatorische Belastung nicht, wie bei Kompressionsbelastung von $K_0 = 1,2$ aus, zunächst einmal abnimmt.

Die Pfadabhängigkeit des Porenwasserdruckverhaltens ist an den unterschiedlichen a_f -Werten (Bild 64) für die verschiedenen Pfade erkennbar und zeigt an, daß die Tendenz zur Dilatanz bei Kompression kleiner ist als bei Extension.

Die hier gewonnenen Ergebnisse unterstreichen die u.a. bei FRANKE & SCHUPPENER (1978) erwähnte Schwierigkeit einer brauchbaren Abschätzung von Porenwasserdrücken aus Belastung für die Untersuchung von Anfangsgrenzzuständen mit effektiven Spannungen. Analysen mit totalen Spannungen und dem Belastungsfall möglichst angepaßter Bestimmung der undrainierten Scherfestigkeit c_u sind gerade für überkonsolidierte Tone nach den hier beobachteten Porenwasserdruckreaktionen der bessere Weg.

8.3.2 ARBEITSLINIEN UND STEIFEMODULI

Die Arbeitslinien $q = f(\epsilon_a)$ der Tone besitzen mit Ausnahme des Lauenburger Tons keine eindeutigen Extremwerte, obwohl bei beginnendem Bruch im Versuch von der Kraft- auf eine Wegsteuerung umgeschaltet wurde. Ursache ist die undrainierte (volumenkonstante) Belastung, bei der Spitzenwerte für q nur bei inhomogener Verzerrung erwartet werden können, die hier durch Endflächenschmierung und die Probenabmessungen stark reduziert wurde und nur bei großen Dehnungen auftrat. Der Lauenburger Ton wies trotzdem Extremwerte auf, da hier die Festigkeit wesentlich durch die bereits beschriebenen stabilisierten Kontakte im Gefüge bestimmt wird. Sind diese erst einmal bei geeigneten deviatorischen Beanspruchungen zerstört worden, kommt es zu einem kollapsartigen Bruch mit abnehmenden q -Werten. Die $r' = f(\epsilon_a)$ -Linien unterstreichen diese Interpretation mit teilweise sehr hohen r' -Werten insbesondere bei Entlastungskompression ($r' = \sigma'_a / \sigma'_r$ ist ein Maß für den am Korngerüst wirksamen Spannungszustand). Allgemein wird der Bruchzustand bei den Tönen sehr früh erreicht.

Die Charakteristik der Arbeitslinien und der Bruchbilder wird von der Struktur der Tone und dem eingprägten Spannungszustand beeinflßt, wie beim Lauenburger Ton und den Miozän-Tönen (lineare Abschnitte in den Arbeitslinien) deutlich erkennbar ist. Die Arbeitslinien $q = f(\epsilon_a)$ können deshalb auch nicht mit dem hyperbolischen Ansatz von KONDNER (1963) beschrieben werden (T-7).

Der Lauenburger Ton zeigt nach den Miozän-Tönen, zunächst überraschend, die höchsten Verformungswiderstände (Bild 59). Nach Kenntnis der Gefügeeigenschaften wird diese Beobachtung

plausibel. Bei den im Triaxialversuch messbaren kleinen Spannungs- und Dehnungsänderungen kann der Einfluß von derartigen Gefügeeigenschaften im Vergleich zum Ödometerversuch sehr viel besser erfaßt werden. Die im Lauenburger Ton vorhandenen stabilisierten Kontakte übernehmen bei beginnender Belastung die Schubspannungen und sorgen so in dieser Versuchsphase für hohe Steifigkeiten trotz der geringen Dichte des Tons und der späteren (bei höheren Spannungen) geringen Steifigkeiten.

Folgerichtig zeigt der Unterkreide-Ton ME, bei dem das Fehlen derartiger Bindungen im Gefüge bereits nach Beurteilung des Kalkgehaltes, der Quelldrücke und der Scherparameter festgestellt wurde, die geringsten Verformungswiderstände bei beginnender Scherbelastung.

Die axiale Steifigkeit der Tone nimmt mit dem mittleren Konsolidationsdruck p allgemein zu. Die Zunahme ist bei den Miozän-Tonen am größten, beim Lauenburger Ton ED am geringsten. Ursache der geringen Zunahme ist wiederum das stabilisierte Gefüge, das bei geringen p -Werten steif reagiert, bei höheren Konsolidationsdrücken aber bereits teilweise zerstört wird, so daß die Steigerung der Steifigkeit mit p gering bleibt. Die hohe Steifigkeitszunahme bei den Miozän-Tonen ist auf die hohe Ausgangsdichte zurückzuführen.

Die Tone zeigen mit Ausnahme des Tones KI bei Entlastungskompression höhere Steifigkeiten (Bild 59) als bei Belastungskompression, was durch die bei Entlastung gegebene Abnahme des mittleren Druckes p und so mit der Zunahme der Wirkung von Bindungskräften in den Tönen zu erklären ist. Der Unterschied zwischen axialer Steifigkeit bei Kompression und Extension ist sehr viel größer als beim Vergleich Entlastung/Belastung. Der betreffende, für den Belastungsbeginn ermittelte Anisotropiewert α_{al} liegt für die Tone ME, SP und ED (Bild 59) zwischen 2,2 und 3,1. Die Tone zeigen also eine hohe Spannungspfadabhängigkeit im Verformungsverhalten. Die Ursache ist auch hier, wie schon bei der Beurteilung des Porenwasserdruckverhaltens, die bei der Kompressionsbelastung bei dem hier gegebenen Konsolidationsspannungszustand zunächst zurückgehende Schubbeanspruchung, während bei Extensionsbelastung der Deviator

weiter negativ zunimmt. Tone mit Eigenspannungszuständen, die durch einen Erdruchdruckbeiwert $K_0 > 1$ gekennzeichnet sind, werden bei Extension also sehr viel geringere axiale Bruchdehnungen zeigen als bei betragsmäßig gleicher Spannungsänderung und Kompression.

In den Standardversuchen mit isotroper Konsolidation wurden geringere Steifigkeitsverhältnisse gemessen. Ursache ist der geringere K-Wert von 1,0, der bei den tatsächlichen K_0 -Werten der Tone über 1,0 eine Vorwegnahme von Kompressionsbelastung bereits in der Konsolidationsphase bedeutet. Die genaue Erfassung der Anisotropie setzt deshalb neben vollkommen ungestörten Proben die möglichst zutreffende Reproduktion des letzten Eigenspannungszustandes voraus und die zutreffende Nachbildung der Belastung, für die das Verformungsverhalten untersucht werden soll.

8.3.3 GRENZZUSTÄNDE

Die wichtigen Ergebnisse der Bestimmung der Scherparameter (T-9, T-10) sind die fehlende Kohäsion beim Unterkreide-Ton ME, die hohe Kohäsion des Lauenburger Tons ED und die sehr hohen Reibungswinkel bei den Miozän-Tonen.

Die Ursache für die hohe Kohäsion des Tones ED sind die bereits erwähnten, vermutlich durch diagenetisch entstandene Kontakte unter Mitwirkung von Ca^{++} -Ionen (siehe 8.1) gebildeten Bindungen zwischen den Tonteilchen oder Aggregaten. Nach Aufbrechen dieser Bindungen im Versuch kommt es durch die dann aufgrund der geringen Dichte nur noch vergleichsweise geringfügig weckbaren Reibung zu kollapsartigen Brüchen. Der Reibungswinkel des Tones ED ist deshalb sehr klein. Der in den Standardversuchen an Proben mit etwas höherem Sandanteil und höherer Dichte gemessene größere Reibungswinkel unterstreicht diese Feststellung.

Die beim Unterkreide-Ton ME fehlende Kohäsion trotz im Vergleich zum Ton ED größerer Dichte und Überkonsolidation kann sicher teilweise auch auf das Fehlen von stabilisierend wirkendem Karbonat zurückgeführt werden. Ganz offensichtlich ist es gerade der Kalkgehalt, der zur Stabilisierung und zum "Einfrieren" früherer Dehnungszustände beiträgt.

Eine weitere Ursache für das Fehlen der Kohäsion im Unterkreide-Ton kann in lokalen, im Bereich der Scherfuge stattfindenden Quellvorgängen und Entfestigungen liegen. Da die Scherfugen beim Ton ME häufig sehr flach liegen (Bild 51), können auch horizontal liegende, optisch nicht erkannte Schwächezonen eine Ursache sein.

Die hohen Reibungswinkel der Miozän-Tone sind auf die vergleichsweise groben, das Gefüge und mechanische Verhalten bestimmenden Bestandteile (Glaukonitkörner, Quarzkörner, Foraminiferen, Konkretionen) zurückzuführen. Die hohe Kohäsion bei diesen Tönen erklären sich durch die hohe Dichte und die verkittend wirkenden Neubildungen im ursprünglichen Porenraum.

Die Textur des Ausgangsgefüges ist für die Grenzzustände nur von geringer Bedeutung, da sie in der Scherfuge ohnehin gestört wird. Die beobachteten Unterschiede bei Kompression und Extension sind bei den Tönen mit Einregelung (ED, ME, SP) größer als bei den gestaltlich isotropen Miozän-Tönen, da sich bei den eingeregelten Tönen für die beiden Arten der Belastung größere erforderliche Umorientierungen ergeben, die letztlich auch zu anderen Grenzbedingungen führen.

9. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Mit der einheitlichen Untersuchung verschiedener Tone mit gleichen Geräten und Methoden wurden eine Reihe typischer Eigenschaften, aber auch charakteristische Unterschiede zwischen überkonsolidierten Tönen gefunden und mit den ermittelten mineralogischen und geologischen Merkmalen erklärt.

Im Rahmen der Klassifikationsuntersuchungen konnte zunächst eine starke Abhängigkeit der erhaltenen bodenphysikalischen Grundkennwerte wie Tongehalt, Konsistenzgrenzen und deren Folgewerte von der aufgewendeten Dispergierenergie und -zeit festgestellt werden, die zu unterschiedlichen Beurteilungen von Tönen führen kann (Bilder 22 und 27).

Wichtigstes Ergebnis bei der Untersuchung des Spannungs-Verformungs-Verhaltens ist die bei allen Tönen vorhandene, unterschiedlich ausgeprägte und stark vom Spannungszustand abhängige Anisotropie im mechanischen Verhalten.

Diese Anisotropie ergibt sich aus unterschiedlichen Verformungseigenschaften in horizontaler (bei allen untersuchten Tönen auch die Richtung der Schichtung, wenn vorhanden) und lotrechter Richtung. Die Messung von ausschließlich rotationssymmetrischen Gefügen unterstützt die Annahme, daß das mechanische Verhalten im ungestörten Boden in verschiedenen horizontalen Richtungen sehr viel weniger unterschiedlich sein wird, insbesondere dann, wenn auch der Primärspannungszustand rotationssymmetrisch ist. Für das beobachtete anisotrope Verhalten konnten 3 Ursachen gefunden werden.

Zunächst beeinflußt der letzte in-situ-Spannungszustand das Verhalten bei neuer Belastung.

Die zweite Ursache ist die gestaltliche Anisotropie, also eine Einregelung im Gefüge, deren Wirkung durch eine hohe Dichte noch verstärkt oder bei geringer Dichte abgeschwächt werden kann.

Schließlich tritt noch der Anteil aus spannungsinduzierter (durch die Art der Belastung erzeugter) Anisotropie hinzu. Es konnte gezeigt werden, daß Tone mit geringer Einregelung, aber hoher Dichte eine ähnlich große Anisotropie besitzen können wie Tone mit hoher Einregelung aber geringer Dichte. Diese Beobachtung konnte über Gefügeuntersuchungen mit den für Dehnungen mikromechanisch erforderlichen Freiheitsgraden für Umorientierungen im Gefüge erklärt werden. Dazu war der Vergleich sehr verschiedener Tone ausgesprochen nützlich.

Mit Versuchen an aufbereiteten, normalkonsolidierten Proben, die im Versuch dann in horizontaler Richtung erwartungsgemäß stärker zusammendrückbar waren als in vertikaler Richtung, konnten die entgegengesetzten Beobachtungen (horizontale Zusammendrückbarkeit geringer als vertikale) bei ungestörten Proben eindeutig auf deren hohe Vorspannung in horizontaler Richtung, die von den Feldversuchen auch angezeigt wurde, und auf ihr Gefüge zurückgeführt werden.

Die Untersuchungen haben weiterhin ergeben, daß bei kleinen bis mittleren Spannungen (bis etwa $\sigma'_{öv}$) bei dem Lauenburger Ton (und dies wird für viele andere Tone ebenfalls zutreffen) diagenetisch entstandene oder verstärkte Bindungen

zwischen Strukturelementen weit größeren Einfluß auf die Verformungseigenschaften nehmen als Überkonsolidierungsgrad und Dichte.

Bei Versuchsspannungen im Ödometer über 2,5 MPa hingegen korrelieren Porenzahl und Steifemoduli bereits wieder signifikant. Auch die Anisotropie geht mit zunehmender Versuchsspannung auf ein Minimum zurück, ist im grundbautechnisch bedeutsamen Spannungsbereich zwischen 0 und 500 kPa jedoch bei allen Tönen, teilweise sehr hoch, vorhanden. Die Quellfähigkeit der Tone ist sehr unterschiedlich und wird neben dem Tonmineralbestand vom Einregelungsgrad und, wie die Untersuchungsergebnisse am Lauenburger Ton vermuten lassen, von den im Gefüge durch geeignete Kontakte zwischen den Strukturelementen aufnehmbaren Zugspannungen beeinflusst. Die Quelldrücke sind senkrecht zur Einregelung stets größer als parallel dazu.

Der auf die Struktur der Tone zurückzuführende Anteil der im Zusammendrückungs- und Quellverhalten beobachteten Anisotropie konnte mikromechanisch auf die leichtere Zusammendrückbarkeit senkrecht zur Einregelung zurückgeführt werden, bei der vorwiegend physikalisch gebundenes Wasser durch Abstandsverkleinerungen zwischen den Teilchenflächen ausgepreßt werden muß. Bei Zusammendrückung parallel zur Einregelung sind hingegen viel stärker behinderte Gefügeänderungen erforderlich.

Die im Ödometer bestimmten Vorbelastungen entsprechen nicht notwendigerweise den geologischen Vorbelastungen und auch nicht unbedingt den zur momentanen Porenzahl äquivalenten Spannungen. Es wurde gezeigt, daß sie auch von den diagenetischen Bindungen im Gefüge abhängige kennzeichnende Spannungen sein können, bei denen eine charakteristische Änderung im Zusammendrückungsverhalten auftritt.

Unabhängig von der zutreffenden mikromechanischen Ursache werden sie in der Bodenmechanik jedoch im tendenziell richtigen Sinne (als Grenzspannung zwischen 2 Bereichen mit unterschiedlichem Zusammendrückungsverhalten) verwendet. An den Ergebnissen der Triaxialversuche mit verschiedenen Spannungspfaden konnte gezeigt werden, daß das Dehnungsverhalten der Tone bei Extensionsbelastung durch sofort auf-

tretende Porenwasserunterdrücke aus Scherbelastung, die als Tendenz zu sofortigem dilatanten Verhalten gedeutet werden können, gekennzeichnet ist. Bei Kompression tritt bei den Tonen, die alle einen Ausgangszustand mit K_0 über 1,0 besitzen und so auch in der Konsolidationsphase belastet wurden, zunächst eine Tendenz zu kontraktantem Verhalten auf, die durch die bei Belastungsbeginn abnehmende Schubbeanspruchung zustande kommt. Je nach Dichte erreichen fast alle Tone dann einen Spannungsbereich, bei dem die Tendenz zu dilatantem Verhalten einsetzt und das weitere Verformungsverhalten maßgeblich bestimmt. Die Ausnahme bildet der Lauenburger Ton, dessen geringe Dichte und die damit verbundenen ausreichenden Freiheitsgrade für Gefügeänderungen als Ursache für nicht-dilatantes Verhalten bei Kompressionsbelastung erkannt wurden.

Die Verformungswiderstände bei beginnender Scherbelastung werden bei den Tonen im untersuchten Spannungsbereich (p) weitgehend, soweit vorhanden, von den diagenetisch entstandenen oder verstärkten Bindungen bestimmt. Es konnte gezeigt werden, daß aus diesem Grunde der Ton mit der geringsten Dichte die zweithöchsten Verformungswiderstände in dieser Versuchsphase besitzt, obwohl er bei höheren Spannungen (Bild 36) die geringste Steifigkeit aller untersuchten Tone zeigt.

Mit dem in allen Untersuchungen erkannten, besonderen Verhalten des Miozän-Tons KI wurde gezeigt, daß die Anisotropie, wie bereits betont, nicht nur vom Gefüge, sondern auch sehr stark von dem letzten in situ vorhandenen Spannungszustand abhängt und damit von den Entspannungsmöglichkeiten am Entnahmeort.

Auch die ermittelten Scherparameter konnten mit den Gefügemerkmalen verbessert interpretiert werden. So mußte die beim Lauenburger Ton aufgrund seiner geringen Dichte in dieser Höhe nicht erwartete Kohäsion auf die auch in anderen Versuchen erkannte Wirkung stabilisierter Kontakte zwischen den maßgeblichen Strukturelementen (Tonminerale oder Aggregate) zurückgeführt werden.

Auch die beobachtete Korrelation der Reibungswinkel mit der Porenzahl e , die mit dieser Signifikanz nicht erwartet

wurde, konnte befriedigend durch die mikromechanisch erkannten, beim Lauenburger Ton stark, beim Unterkreide-Ton schwächer und bei den Miozän-Tonen nur geringfügig vorhandenen Freiheitsgrade für die Umlagerung der maßgeblichen, unterschiedlich großen Strukturelemente interpretiert werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen können wie folgt zusammengefaßt werden:

- 1) Die Tone besitzen Mikrostrukturen, die sich in den

- Dichten
- Strukturelementen
- Einregelungen
- Bindungskräften

unterscheiden und deshalb ein ausgeprägt individuelles, durch den letzten in-situ-Spannungszustand und die typischen Eigenschaften des Tonmineralinventars zusätzlich beeinflusstes Verhalten bei Klassifikation und mechanischer Beanspruchung zeigen.

- 2) Die beobachteten bodenmechanischen Verhaltensweisen können mit Untersuchungen zu Mineralbestand und Gefüge eindeutiger interpretiert werden.
- 3) Die untersuchten Tone zeigen eine, teilweise mit dem Kalkgehalt korrespondierende Abhängigkeit der an aufbereitetem Material zu bestimmenden Bodenparameter von der Dispergierenergie und -zeit, die zu unterschiedlichen Beurteilungen und Einschätzungen der Tone führen kann (Bilder 22, 24, 27).
- 4) Die Tone zeigen alle ein ausgeprägt individuelles Verhalten, auch wenn einige gemeinsame Korrelationen von Kennwerten beispielsweise mit den Porenzahlen oder ähnliche Tendenzen bei den Anisotropieparametern festgestellt wurden. Die Übertragbarkeit von Versuchsergebnissen ist deshalb auch bei Tönen der gleichen stratigraphischen Einheit nicht notwendigerweise gegeben.
- 5) Das Alter oder die Vorbelastung und Überkonsolidation der Tone sind nicht unbedingt maßgeblich für das mechanische Verhalten. Auch junge Tone können diagenetisch entstandene oder verstärkte, im mechanischen Verhalten

wirksame Bindungen zwischen den Strukturelementen besitzen. So können bei Spannungen, die kleiner sind als die zur Zerstörung der Bindungen erforderlichen Beträge, steife Tone mit großer Porenzahl höhere Steifigkeiten besitzen als beispielsweise halbfeste Tone mit wesentlich geringerer Porenzahl, aber ohne diagenetische Verfestigungen.

- 6) Die Tone verhalten sich anisotrop, die beobachtete Anisotropie konnte auf 3 Ursachen zurückgeführt werden:
 - a) gestaltliche Anisotropie im Mikrogefüge, meßbar mit Texturanalysen
 - b) Eigenspannungszustand vor der neuen Belastung, bei den untersuchten Tönen gekennzeichnet durch K_0 größer 1
 - c) Art der Belastung, spannungsinduzierter Anisotropieanteil (Pfadabhängigkeit)
- 7) Die Anisotropie im mechanischen Verhalten tritt bei Gebrauchs- und Grenzzuständen auf, ist sehr stark vom Spannungsniveau abhängig und bei kleinen Spannungsänderungen besonders hoch.
- 8) Die beschriebenen Ursachen für das beobachtete anisotrope Verhalten treten bei überkonsolidierten Tönen fast immer parallel auf, so daß das Verhalten eines Tones auch bei Kenntnissen über eine der Anisotropieursachen nicht vorhergesagt werden kann.
- 9) Die Deutung der im Ödometerversuch z.B. nach CASAGRANDE im Bereich der maximalen Krümmung der Druck-Porenzahl-Linie ermittelten Spannung als maximale geologische Auflast sollte zugunsten der von GUDEHUS (1981) vorgeschlagenen Interpretation (äquivalente Spannung) endgültig aufgegeben werden. Bei einer diagenetischen Verfestigung ist auch diese Interpretation nicht zutreffend.
- 10) Die Scherparameter der Tone werden von der Größe der maßgeblichen Strukturelemente, den Freiheitsgraden für Umlagerungen im Gefüge und den Bindungskräften zwischen den Strukturelementen beeinflusst. Einregelungen werden mit zunehmender Dichte wirksamer, bei hohen Porenzahlen sind sie von untergeordneter Bedeutung.
- 11) Die Tone zeigen eine je nach Dichte, Ausgangsspannungszustand und Belastungspfad unterschiedliche Tendenz zu

kontraktantem oder dilatantem Verhalten (drainierte Belastung) bzw. zu unterschiedlichen Porenwasserdruckreaktionen (undrainierte Belastung). Gerade diese führt bei der Abschätzung von Porenwasserdrücken für Anfangsstandsicherheitsanalysen mit effektiven Spannungen zu kaum beherrschbaren Schwierigkeiten.

- 12) Die Reibungswinkel der Tone korrelieren signifikant mit den Porenzahlen (Einfluß der Freiheitsgrade für Umlagerungen von Strukturelementen) während die Kohäsionen von den mit Alter, Überkonsolidation oder Mineralbestand nicht eindeutig verknüpfbaren Bindungskräften im Gefüge bestimmt werden.

Für die bodenmechanische Praxis ergeben sich aus diesen Ergebnissen eine Reihe von Folgerungen, die die Klassifikation derartiger Tone, die Untersuchung ihres mechanischen Verhaltens für Gebrauchs- und Grenzzustände, das Bauen in oder auf den Tonen und künftig notwendige Untersuchungen betreffen.

KLASSIFIKATION

Bei der Ausführung von Bauwerken in oder auf überkonsolidierten Tonen kann es durch die Baumaßnahmen zu neuen Verwitterungsprozessen kommen, bei denen sich die maßgeblichen, meist günstigen bodenmechanischen Parameter des unverwitterten Materials sehr stark ändern können (z.B.: ϕ' , c' , E_s). Die Änderungen können bei diagenetischer Verfestigung, die von der Verwitterung möglicherweise zerstört wird, besonders hoch sein. Solche Verwitterungsprozesse können neben klimatischen Einflüssen, Änderung der chemischen Zusammensetzung des Porenwassers usw. auch Strukturveränderungen durch Entspannung und zusätzliches Wasserangebot (Quellvorgänge) als Ursache haben.

Bereits bei der Klassifikation kann dies berücksichtigt werden.

So ist es sinnvoll, die zur Bestimmung von Korngrößenverteilungen und Konsistenzgrenzen sowie den sich daraus ergebenden Folgewerten aufzuwendende Dispergierenergie und Dispergierzeit den jeweiligen in-situ zu erwartenden Bedingungen anzupassen.

Liegt beispielsweise der oben beschriebene Fall (Entspannung und Wasserangebot) vor und kann das Wasser von der Oberfläche oder über Störungen im Makrogefüge dem betroffenen Bereich zufließen, so ist für die Klassifikationsuntersuchungen ein weitestgehender Aufschluß des Tones mit hoher Dispergierenergie und/oder längerer Dispergierzeit sinnvoll. Damit werden die in-situ mittel- oder langfristigen möglichen Änderungen im Ton besser erfaßt, so daß der Ton zutreffender klassifiziert und beurteilt wird. Bild 27 illustriert diesen Effekt. Dort kommt es durch eine verlängerte Dispergierzeit zu einer Verschiebung des Miozän-Tones KI im Plastizitätsdiagramm (DIN 18196) vom Bereich TM (mittelplastischer Ton) bis an die Grenze zum Bereich TA (ausgeprägt plastischer Ton).

Liegt ein Fall vor, bei dem ein Ton durch die Baumaßnahme keinen zusätzlichen Verwitterungseinflüssen ausgesetzt wird, ist eine über die übliche Praxis (DIN 18122, DIN 18123) hinausgehende Dispergierung nicht sinnvoll, da der damit simulierte Aufschluß des Tones mit der Zerstörung eventueller diagenetischer Verfestigungen und Aggregatierungen in-situ nicht stattfinden kann. In einem solchen Fall würde beispielsweise die Einstufung des Miozän-Tones KI als mittelplastischer Ton zutreffender sein als die Einstufung als fast ausgeprägt plastischer Ton (Bild 27).

Aus diesen Überlegungen und den ihnen zugrundeliegenden Versuchsergebnissen folgt unmittelbar, daß beim Bauen in oder auf überkonsolidierten Tönen in allen Phasen sehr genau darauf zu achten ist, daß die meist sehr günstigen bodenmechanischen Eigenschaften der Tone erhalten bleiben und sich nicht durch Materialveränderungen von innen heraus, die mit der Belastung nichts zu tun haben, verändern können.

Derartige ungünstige Verschiebungen der Materialeigenschaften können neben den beschriebenen Ursachen (neue Belastungsverhältnisse und hydrologische Verhältnisse, neue chemische Zusammensetzung des Sicker- oder Porenwassers, verstärkte Klimaeinflüsse) auch durch dynamische Beanspruchungen (Zerstörung von Bindungen im Gefüge) entstehen und sollten gegebenenfalls berücksichtigt werden.

GEBRAUCHSZUSTÄNDE

Da die Anisotropie von überkonsolidierten Tönen besonders bei Gebrauchszuständen sehr hoch sein kann, ist ihre Berücksichtigung bei grundbaustatischen Berechnungen wünschenswert und könnte zu wirtschaftlicheren und sichereren Bemessungen, beispielsweise im Tunnelbau, bei Setzungsberechnungen, Verbaumaßnahmen und auch bei der Festlegung von Böschungsneigungen führen.

Der Berücksichtigung von anisotropem Verhalten stehen zur Zeit jedoch noch einige Schwierigkeiten entgegen.

So können die einflußnehmenden Primärspannungszustände überkonsolidierter Tone noch nicht hinreichend genau gemessen werden.

Die sehr starke Abhängigkeit der Anisotropie vom Spannungs- und Dehnungszustand erschwert die Verwendung von im Hinblick auf den numerischen Aufwand noch vertretbaren elastisch-anisotropen Ansätzen. Noch schwieriger, wenn nicht gar unmöglich, wird eine numerische Erfassung des Stoffverhaltens, wenn diagenetische Verfestigungen im zu untersuchenden Ton vorhanden sind.

Eine dem Stand der Wissenschaft bei rolligen Böden entsprechende numerische Behandlung überkonsolidierter Tone erfordert zunächst weitere langfristige Forschung.

Notwendig ist hier vor allem die Weiterentwicklung der messtechnischen Erfassung des mechanischen Verhaltens in-situ bis mindestens zum betreffenden Stand bei nichtbindigen Böden.

Dazu müssen Verfahren entwickelt werden, mit denen bei möglichst geringer Störung des in-situ-Zustandes Messgeber vor Baumaßnahmen eingebaut werden können, die Primärspannungen und deren Änderungen verläßlich erfassen.

Diese Meßgeber müssen nach den vorliegenden Erfahrungen aktiv sein in dem Sinne, daß lokale Entspannungen in der Umgebung des Gebers, die beim Einbau entstehen, weitgehend rückgängig gemacht werden. Auch dann wird jedoch die Kriechfähigkeit der Tone zur Regeneration des lokal gestörten Primärspannungszustandes benötigt werden, so daß derartige Meßgeber stets möglichst lange vor Beginn der zu erfassenden Baumaßnahme installiert werden müssen.

Auf die Bestimmung von Verformungsparametern im Labor wird auch in Zukunft nicht verzichtet werden können.

Die hohen Steifigkeiten von überkonsolidierten Tonen erfordern dabei einen besonderen Aufwand, der neben einer gezielten Festlegung der Versuchsspannungen und der Randbedingungen wie Wasserangebot, Belastungszeit usw. auch die messtechnische Seite betrifft.

Geologische Vorbelastungen können aus den Ergebnissen von Ödometerversuchen nur in Ausnahmefällen abgeleitet werden. Die Erfassung der Einflüsse von gestaltlicher Anisotropie und auch die Abhängigkeit der Verformungsmoduli von dem jeweiligen Belastungspfad gerade bei kleinen Spannungsänderungen erfordern eine besondere Versuchstechnik.

Dies insbesondere dann, wenn mit numerischen Verfahren Spannungen und Verformungen genauer als üblich berechnet werden sollen.

GRENZZUSTÄNDE

Bei der Bestimmung der Scherparameter sind gerade bei überkonsolidierten Tonen Versuche angebracht, die den Primärspannungszustand und die Spannungsänderungen durch das Bauvorhaben (Spannungspfad) mindestens qualitativ zutreffend berücksichtigen.

Ein Ton, der im Zuge des Bauvorhabens (beispielsweise über Entspannung und Wasseraufnahme) seine Struktur verändern kann, sollte auch bei der Bestimmung der Scherparameter in diesem Zustand untersucht werden. Die Bestimmung der Restscherfestigkeit reicht dazu nicht notwendigerweise aus, eventuell muß der Ton in einem Zustand der Teilquellung untersucht werden. Aufbereitung und Rekonsolidation sind zur Simulation von Entfestigung nicht unbedingt geeignet, da dabei eine Einregelung, die je nach Beanspruchung auch ungünstig sein kann, zerstört wird.

Von großer Bedeutung ist in jedem Falle die Aufnahme des jeweiligen Versuches bei einem dem letzten in-situ-Spannungszustand möglichst nahekommenden Konsolidationsspannungszustand, unabhängig davon, ob das Spannungsniveau zur Simulation der in-situ-Belastung dann erhöht oder verringert wird.

Die Untersuchung der Standsicherheiten von Bauwerken oder Böschungen in überkonsolidierten Tonen mit effektiven Spannungen hat wenig Aussicht auf Erfolg und sollte aufgegeben werden. Die dafür erforderliche Abschätzung von Porenwasserdruckinkrementen ist nicht nur wegen der sehr stark vom Spannungsniveau und dem Belastungspfad abhängigen Porenwasserdruckentwicklung kaum möglich, auch die Auswahl repräsentativer Bodenelemente und die Berechnung der dort durch die Baumaßnahme auftretenden Spannungsänderungen sind sehr schwierig (siehe u.a. Bild 7, 62, 63).

Die Standsicherheitsanalyse mit totalen Spannungen bei dem in-situ-Zustand und der Belastungsart möglichst angepaßter Bestimmung der undrainierten Scherfestigkeit ist der in diesen Fällen eindeutig bessere Weg.

Auch bei der Untersuchung des Verhaltens überkonsolidierter Tone im Grenzzustand ist die Weiterentwicklung der in-situ-Meßtechnik erforderlich.

Dies gilt insbesondere für die Erfassung von Porenwasserdruckänderungen durch Be- und Entlastungen und betrifft auch den Abbau der häufig sehr hohen, ausnutzbaren Anfangs-festigkeit überkonsolidierter Tone auf die geringere End-festigkeit z.B. bei Entlastung (siehe dazu Bild 15) durch die Absättigung entstandener Porenwasserunterdrücke.

Schließlich sollte, in Zusammenarbeit mit Geologen und Mineralogen die Untersuchung und eventuell die Klassifikation der in überkonsolidierten Tonen häufig vorhandenen und für das mechanische Verhalten oft ausschlaggebenden Bindungen zwischen den maßgeblichen Strukturelementen, die durch diagenetische Wirkungen noch verstärkt sein können, vorangetrieben werden. Dies um so mehr, als diese Bindungen möglicherweise bei Einwirkungen von aggressiven Stoffen (belastete Grund- und Sickerwässer, Deponiewässer) und Verwitterung nicht langfristig stabil sind.

Bisher erschienene Mitteilungshefte des Instituts für
Grundbau und Bodenmechanik TU Braunschweig

- Nr. 76-1 Scheffler, E. : Die abgesteifte Baugrube, berechnet mit nichtlinearen Stoffgesetzen für Wand und Boden, 1976
- Nr. 78-2 Frank, H. : Formänderungsverhalten von Bewehrter Erde - untersucht mit Finiten Elementen, 1978
- Nr. 79-3 Schnell, W. : Spannungen und Verformungen bei Fangedämmen, 1979
- Nr. 80-4 Ruppert, F.-R. : Bodenmechanische Eigenschaften der Lauenburger Serie - Ein Beispiel für Statistik in der Bodenmechanik, 1980
- Nr. 81-1 Schuppener, B. : Porenwasserüberdrücke im Sand unter Wellenbelastungen auf Offshore-Bauwerke
- Nr. 6 Wolff, F. : Spannungen und Verformungen bei Asphaltstraßen mit ungebundenen Tragschichten, 1981
- Nr. 7 Bätcke, W. : Tragfähigkeit gedrungener Körper im geneigten Halbraum, 1982
- Nr. 8 Meseck, H.
Schnell, W. : Dichtungswände und -sohlen, 1982
- Nr. 9 Simons, H.
Ruppert, F.-R. : Entwicklung geeigneter Verfahren zum Messen der physikalischen Eigenschaften von Bentonit-Suspensionen auf Baustellen, 1982
- Nr. 10 Beckmann, U. : Einflußgrößen für den Einsatz von Tunnelbohrmaschinen, 1982
- Nr. 11 Papakyriakopoulos, P.: Verhalten von Erd- und Steinschüttdämmen unter Erdbeben, 1983
- Nr. 12 Sondermann, W. : Spannungen und Verformungen bei Bewehrter Erde, 1983
- Nr. 13 Meseck, H. : Sonderheft zum 10 jährigen Bestehen des Instituts, 1984



Reproduktion und Druck:

Beyrich Reprografie · Bültenweg 73 · 3300 Braunschweig · Telefon (05 31) 34 09 04

